



Viliam Bárek
Jakub Fuska
Oliver Obročník
Martina Kováčová



SPU·FZKI
Fakulta záhradníctva
a krajinného
inžinierstva



SPU·VC ABT
Výskumné centrum
AgroBioTech

Metodika riadenia závlahy s využívaním nízkotlakových technológií

2023



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



Názov:

Metodika riadenia závlahy s využívaním nízkotlakových technológií

Autori:

prof. Ing. Viliam Bárek, CSc.

Ing. Jakub Fuska, PhD.

Ing. Oliver Obročník

Ing. Martina Kováčová, PhD.

Recenzenti:

prof. Ing. Dušan Húska, PhD.

Fakulta záhradníctva a krajinného inžinierstva, emeritný profesor

Ing. Robert Lenárt

HYDROMELIORÁCIE, š.p. Bratislava

PodĎakovanie:

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Udržateľné systémy inteligentného farmárstva zohľadňujúce výzvy budúcnosti 313011W112, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



SPU·VC ABT
Výskumné centrum
AgroBioTech



SPU·FZKI
Fakulta záhradníctva
a krajinného
inžinierstva

Schválila rektorka Slovenskej poľnohospodárskej univerzity v Nitre dňa 29. 6. 2023 ako metodickú príručku.

Táto publikácia je publikovaná pod licenciou Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International Public License (CC BY-NC-ND 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Prvé vydanie.

Neprešlo redakčnou úpravou vo Vydavateľstve SPU v Nitre.

ISBN 978-80-552-2619-4

1 ÚVOD

Klimatická zmena, je prirodzeným procesom prebiehajúcim na našej planéte milióny rokov. Proces klimatickej zmeny je ovplyvnený množstvom skleníkových plynov v zemskej atmosfére, pričom jedným z najvplyvnejších z nich je oxid uhličitý (CO_2). Na základe vedeckých výskumov ústupov a postupov ľadovcov, vedci zistili koncentráciu oxidu uhličitého v rôznych vrstvách ľadu. Vďaka tejto analýze určili obdobia globálnych klimatických zmien za posledných 650 000 rokov. Súčasná klíma sa postupne otepľuje, pričom ľudstvo k tomuto trendu výrazne prispelo svojou činnosťou. Od roku 1880 človek prostredníctvom rozvoja priemyslu a nástupom spaľovania priemyselných palív, narušil prirodzený priebeh zmeny zemskej klímy. Následkom tohto pokroku, je klimatická zmena, ktoré sa prejavuje nárastom teploty atmosféry, narušením prirodzených klimatických cyklov, ako aj zmenami ročných období, ako ich poznáme. Zmeny v rozložení ročných úhrnov zrážok spolu s nárastom teploty za posledných 40 rokov majú za následok čoraz dlhšie obdobia sucha. V súčasnosti sa výskumy zameriavajú na predpoklad vývoja globálnej klímy a dôsledky tohto procesu na život na našej planéte. Vedci skúmajú sucho a jeho vplyv na vodný režim rastlín. Tieto výskumy umožňujú lepšie porozumenie biologickým procesom v rastlinách a získanými poznatkami chcú umožniť dosiahnutie maximálnej poľnohospodárskej úrody.

Jedným z hlavných smerov výskumov vplyvu klimatickej zmeny je skúmanie sucha a jeho vplyv na poľnohospodársku výrobu. Všeobecne je sucho definované ako zrážkový deficit, ktorého následkom je nedostatok pôdnej a podzemnej vody. Účinok na poľnohospodárke plodiny, a tým aj produkciu môže byť devastujúci. Slovensko v posledných dvoch dekádach čelilo zvýšenej periodicite suchých období. Zvýšený výskyt bezzrážkových dní je zaznamenaný hlavne v poľnohospodársky významných oblastiach, ako sú Podunajská a Východoslovenská nížina. Následkom sucha je zvýšený nárok na pôdnu vlhkosť a nárast potreby dodatočného zavlažovania poľnohospodárskych plodín.

2 KLIMATICKÁ ZMENA A JEJ VŠEOBECNÝ VPLYV NA RASTLINY

Svetová meteorologická organizácia zhromažďuje a vyhodnocuje dáta všetkých meteorologických staníc na svete už od roku 1866 (SHMÚ, 2020). Z jej správy vyplýva, že globálna teplota v roku 2020 bola o $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyššia ako v období medzi rokmi 1850 až 1900. Tento fakt zaraďuje rok 2020 medzi tri najteplejšie roky v histórii meteorologických záznamov, pričom najteplejším rokom bol rok 2016 (IPCC, 2018). V porovnaní s dátami za posledných 100 rokov bol nárast teploty vyšší o $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SHMÚ, 2020). Klimatická zmena sa najsilnejšie a najkomplexnejšie prejavuje na atmosférických systémoch, a to najmä zmenami v distribúcii a objeme atmosférických zrážok a zmenami teplôt atmosféry. V posledných troch dekádach sú zaznamenané dopady klimatickej zmeny prejavujúce sa ako stále častejšie a dlhšie periódy sucha, ktoré majú za následok lesné požiare, extrémne výkyvy počasia – suché a veľmi chladné zimy, tropické búrky alebo veterné smršte (World Meteorological Organization - WMO, 2021).

Meteorologické záznamy zo siete meteorologických staníc na Slovensku ukazujú, že od roku 1961 sa priemerná ročná teplota zvyšuje v určitých lokalitách každých 10 rokov, čím sa menia aj meteorologické mapy Slovenska a pribúdajú pásma s priemernou ročnou teplotou 10,5 – 11,0 °C a 11,0 – 11,5 °C. Analýzou dát a modelovaním vývojových trendov počasia, prognózy poukazujú na pravdepodobný trend otepľovania na Slovensku do roku 2035, ktorý predpokladá pribudnutie ďalších dvoch teplotných pásiem (11,5 – 12,0 °C a 12,0 – 12,5 °C). Do roku 2100 je predpoklad pribúdania teplejších pásiem s priemernou ročnou teplotou až 13,5 – 14,0 °C (Čimo et al., 2020). So zvyšujúcimi sa teplotami bola ovplyvnená aj distribúcia zrážok. Od roku 1981 bol zaznamenaný priemerný pokles objemu atmosférických zrážok o 5,6 %. Tento pokles je rovnako, ako pri teplote nerovnomerný. Zatiaľ, čo vo vysokohorských, severovýchodných oblastiach bol zaznamenaný pokles v priemere 5 %, v nížinných oblastiach najmä na juhu územia bol tento pokles až 10 % (SHMÚ, 2020b).

Suché podmienky v oblasti severnej a strednej Európy počas jari a leta 2020 mali vplyv na poľnohospodársku produkciu v najvýznamnejších poľnohospodárskych oblastiach Slovenska. Ďalšia vlna vysokých teplôt bola v Európe zaznamenaná v Auguste (WMO, 2021). So stúpajúcou teplotou vzduchu stúpa aj teplota pôdy, čím dochádza k ovplyvňovaniu dostupnosti vody pre rastliny, a tým aj životných procesov rastlín, ako sú fotosyntéza, transpirácia, vývoj rastlín a príjem živín, čo ovplyvňuje vodnú bilanciu rastlín. V prípade negatívnej vodnej bilancie rastlín, hovoríme o vodnom deficite. Vodný deficit má výrazný vplyv na poľnohospodársku produkciu a to hlavne na rast a vývoj rastlín, redukcii listov a zatváranie prieduchov. Na základe vedeckých štúdií, ktoré predpokladajú zmeny vodných bilancií poľnohospodársky významných povodí v neprospech poľnohospodárskej výroby, je nutné, aby zavlažovacie systémy na poľnohospodárskej pôde využívali vodné zdroje čo najefektívnejšie (Rehák et al., 2015).

2.1. Vodný režim rastlín

Pre rastlinné ekosystémy je voda v kvapalnom skupenstve najvýznamnejším produkčným faktorom. Rastliny potrebujú veľké množstvo vody a živín počas celého životného cyklu. Všetky aspekty vývoja rastlín sú závislé na obsahu vody v pôde. Zníženie pôdnej vlhkosti vedie k zmenám prostredia, ktoré majú vplyv na fyziologické a biochemické procesy prebiehajúce v rastlinách (Silva et al., 2009). Všetky procesy, ktoré v rastline prebiehajú za účelom príjmu, transportu, výdaju a udržania vody v bunke rastlín nazývame vodným režimom rastlín.

Voda sa v rastlinách vyskytuje v troch frakciách:

- (i) voľná voda alebo kapilárna voda bunkových membrán a osmoticky prijatej bunečnej šťavy, ktorá sa neuplatňuje pri tvorbe hydratačných obalov iónov a molekúl,
- (ii) slabo viazaná voda, ktorá zahrňuje osmoticky prijatú a štruktúrne viazanú vodu, ako aj vodu difúzných vrstiev hydratačných obalov, ktorých molekuly si uchováli pohyblivosť a
- (iii) pevne viazaná voda hydratačných obalov iónov a molekúl nízko i vysokopolymérnych zlúčenín protoplazmy (Rehák et al., 2015).

Obsah vody v rastline je definovaný výpočtom relatívneho obsahu vody (Relative water content – RWC). RWC úzko súvisí s objemom vody v bunkách, najčastejšie listu, a môže odrážať rovnováhu medzi prívodom toku vody do listu a rýchlosťou transpirácie. Metóda výpočtu RWC tkvie vo výpočte aktuálneho obsahu vody v liste pomerne k maximálnemu obsahu vody v turgescentnom rastlinnom pletive (Lugoian a Ciulca, 2011). Obsah vody v rastline je ovplyvnený fyzikálnymi vlastnosťami samotnej vody a okolitého prostredia, vegetačným štádiom a vekom rastliny, pričom rastlina je schopná svoj vodný stav čiastočne ovplyvňovať. Reguláciou vodného stavu rastliny udržiavajú svoju vodnú bilanciu v rovnováhe (Assouline et al., 2012). Regulačné mechanizmy rastlín ako transpirácia, otváranie a zatváranie prieduchov a príjem vody prostredníctvom koreňového systému sú viazané na denné a vegetačné cykly rastlín. To znamená, že aktuálna vodná bilancia rastlín sa rovná rozdielu medzi aktuálnymi vstupmi (príjmom) a aktuálnymi výstupmi (výdajom) vody a jej hodnoty sa neustále menia.

2.2. Vzťah medzi vodou a pôdou

Vodný režim pôdy popisuje kvalitatívne a kvantitatívne zmeny obsahu vody v zóne nenasýtenej pôdy na konkrétnej lokalite počas určitého obdobia. Určuje produktivitu, závislosť od prítoku a odtoku vody v nenasýtenej pôdnej zóne (Štekauerová, et al., 2006). Zrnitosťné zloženie pôdy má výrazný vplyv na jej fyzikálne a chemické vlastnosti, vzdušnú, vodnú a tepelnú kapacitu, štruktúru, priepustnosť a iné. Obsah vody v pôde alebo vlhkosť pôdy sa vyjadruje v relatívnych jednotkách. Jej rozdelenie v pôdnom profile a hodnota sú premenlivé ako výsledok nepretržitého pohybu vody v pôde. Smer a rýchlosť pohybu pôdnej vody sú závislé od síl, ktoré pôsobia medzi tuhú fázu pôdy a vodou, ktorá sa nachádza v pôdnych póroch. Hodnota vlhkosti pôdy sa pohybuje od úplne suchej až po úplne vlhkú pôdu, v závislosti od prírodných podmienok. Jej hodnota je ovplyvnená evapotranspiráciou alebo infiltráciou vody z povrchu pôdy, pričom určité charakteristické hodnoty sa nazývajú hydrolimity (Antal et al., 2014). Podľa síl, ktoré v pôde vodu viažu rozoznávame tieto kategórie pôdnej vody:

- (i) adsorpčnú – ovplyvnenú adsorpčnými silami vznikajúcimi na povrchu pôdnych častíc,
- (ii) kapilárnu – ovplyvnenú kapilárnymi silami, ktoré vznikajú zakrivením vodnej hladiny v pôdnych póroch sa pohybuje všetkými smermi a
- (iii) gravitačnú – ovplyvňovanú gravitačnou silou Zeme. Gravitačná voda je najslabšie viazaná a vykazuje najvyšší vodný potenciál. V pôdnom profile sa pohybuje vertikálnym smerom (Vavíček a Kučera, 2015). Hydrolimity predstavujú hranice medzi kategóriami pôdnej vody (Rehák et al., 2015). et al. (2009) rozdeľuje hydrolimity na základné a aplikované. Hydrolimity delíme nasledovne:

- a) Podľa hranice medzi jednotlivými kategóriami pôdnej vody:

Adsorpčná vodná kapacita Θ_A , w_A – charakterizuje vlhkosť pôdy na hranici medzi adsorpčnou a kapilárnou pôdnou vodou. Vyjadruje maximálne množstvo vody v pôde viazané adsorpčnými silami ($pFA = 4,8 - 5,2$) (Antal et al., 2014).

Polná vodná kapacita Θ_{PK} , w_{PK} – charakterizuje vlhkosť pôdy medzi kapilárnou a gravitačnou vodou. Vyjadruje maximálne množstvo zavesenej v pôdnom profile, ktoré bolo odmerané v poľných podmienkach ($p_{FK} = 2,0 - 2,9$). Teda množstva vody, ktoré je pôda schopná trvalejšie zadržať v takmer rovnovážnom stave po nadmerné zavlaženie. Tento hydrolimit je v literatúre uvádzaný aj ako retenčná vodná kapacita (Pospíšilová et al., 2016).

Plná vodná kapacita Θ_S , w_S – charakterizovaný vlhkosťou pôdy pri úplnom nasýtení pôdnych pórov vodou ($p_{FS} = 0$). Nazýva sa aj maximálna vodná kapacita (Antal et al., 2014).

b) Podľa prístupnosti pôdnej vody pre rastliny:

Bod zníženej dostupnosti Θ_{ZD} , w_{ZD} – charakterizuje vlhkosť pôdy, pri ktorej sa podstatne znižuje pohyblivosť pôdnej vody a jej prístupnosť pre rastliny ($p_{FZD} = 3,1 - 3,5$) (Antal et al., 2014).

Bod vädnutia

Θ_V , w_V – charakterizovaný vlhkosťou pôdy, pri ktorej sú rastliny trvale nedostatočne zásobené pôdnou vodou, pretože intenzita absorpcie vody koreňmi rastlín je podstatne nižšia, ako je intenzita transpirácie. Pri tejto pôdnej vlhkosti rastliny nie sú zásobené vodou, klesá turgor a prejavuje sa vädnutie rastlín ($p_{FV} = 4,18$) (Vavíček a Kučera 2015).

V súčasnosti existujú dve koncepcie určovania prístupnosti pôdnej vody – statická (klasická) a dynamická koncepcia. Častejšie sa využíva klasická koncepcia, najmä pri riadení závlahového režimu, podľa ktorej pôda môže obsahovať maximálne také množstvo prístupnej pôdnej vody, ktoré zodpovedá vlhkosťnému potenciálu medzi hydrolimitmi poľná vodná kapacita Θ_{PK} a bod vädnutia Θ_V :

$$W_{VK} = \Theta_{VK} \cdot h_u = (\Theta_{PK} - \Theta_V) \cdot h_u \quad (1)$$

kde:

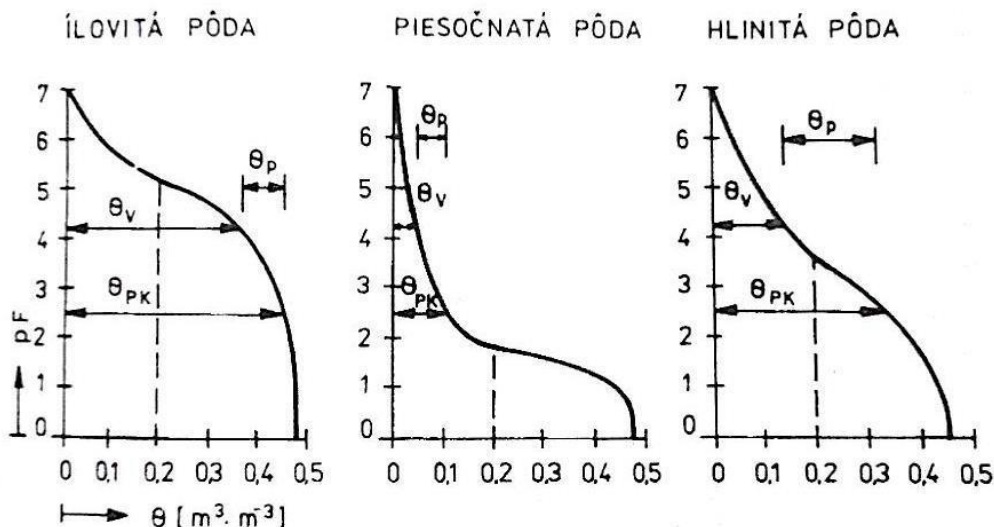
W_{VK} – maximálna zásoba prístupnej pôdnej vody (1), ktorá sa môže nachádzať v profile _____ hrúbky h_u (mm),

Θ_{VK} – využiteľná vodná kapacita pôdy ($\Theta_{PK} - \Theta_V$) ($m^3 \cdot m^3$),

h_u – účinná hĺbka pôdneho profilu, t.j. hrúbka časti pôdneho profilu meraná od povrchu pôdy, z ktorej čerpá pestovaná rastlina podstatnú časť vody – teda kde sa nachádza podstatná časť koreňového systému rastliny, ktorý sa počas vegetačného obdobia vyvíja (mm).

Využiteľná vodná kapacita Θ_{VK} konkrétnej pôdy sa najpresnejšie určí pomocou vlhkosťnej retenčnej krivky (p_F krivky) (Obr. 1). Jej tvar sa mení v závislosti od pôdneho dru-

hu (Antal et al., 2014):



Obr. 1 Hodnota využiteľnej vodnej kapacity pôdy podľa pôdneho druhu (Antal et al., 2014)

Dynamická koncepcia prístupnosti pôdnej vody pre rastliny vychádza z poznatkov štúdia pohybu vody v systéme PRAT. Podľa dynamickej koncepcie je prístupnosť pôdnej vody pre rastliny funkciou:

- 1) pôdných faktorov (hydraulická vodivosť, retenčné charakteristiky),
- 2) rastlinných faktorov (hustota a dĺžka koreňov, rýchlosť rastu koreňov,...),
- 3) meteorologických faktorov (vlhkosť, teplota vzduchu, prúdenie vzduchu,...) (Antal et al., 2014).

2.3. Sucho

Sucho je prírodný jav, ktorý sa šíri v celom hydrologickom cykle. Je jedným z najnebezpečnejších prírodných rizík. Všeobecne je spájané s nedostatkom atmosférických zrážok, pôdnej vlhkosti a dostupnosti vody v porovnaní s normálom (očakávanými úrovňami) v určitej oblasti (Portela et al., 2015). Svetová meteorologická organizácia definovala sucho v roku 1992 ako „Períodu neobvykle suchého počasia dostatočne dlhého na to, aby nedostatok zrážok spôsobil vážnu hydrologickú nerovnováhu“. Dodnes neexistuje jednoznačná definícia sucha a preto sa definície sucha rozdeľujú do štyroch základných kategórií podľa dominujúcich prejavov (Wilhite a Glantz, 1985):

- meteorologické sucho – vzniká v dôsledku nedostatku zrážok v porovnaní s normálom počas určitého obdobia. Nedostatok zrážok býva kombinovaný so zvýšenou potenciálnou evapotranspiráciou, ktorý sa rozprestiera na veľkej ploche a pokrýva rozsiahle časové obdobie.

- hydrologické sucho – je dôsledok nedostatočného dopĺňania podzemných vôd v dôsledku nedostatku zrážok a zvýšenou spotrebou vody rastlinami. Hydrologické sucho je široký pojem súvisiaci s negatívnymi anomáliami v povrchových a podpovrchových vodách.
- poľnohospodárske sucho – alebo pôdne sucho nastáva, keď sa znižuje dostupnosť pôdnej vody pre rastliny.
- socio-ekonomické sucho – je spojené s dopadmi troch vyššie uvedených typov. Môže sa vzťahovať na neschopnosť systémov vodných zdrojov splňať požiadavky na vodu a na ekologické alebo zdravotné dopady sucha.

Sucho môže viesť k nedostatku živín aj v dostatočne hnojenej pôde. Je to zapríčinené znížením pohyblivosti a absorpcie jednotlivých živín. Tie vedú k zníženiu rýchlosti rozptylu minerálov z pôdneho matrixu ku koreňom. Z tohto dôvodu je sucho najviac limitujúcim stresovým faktorom pre rastliny (da Silva et al., 2011).

2.4. Diaľkový prieskum Zeme

Diaľkový prieskum Zeme (DPZ) je spôsob získavania informácií o zemskom povrchu a jeho štruktúrach pomocou snímokovania z vtáčej perspektívy. Využíva elektromagnetické žiarenie v rôznych intervaloch svetelného spektra, ktoré je emitované alebo odrazené od zemského povrchu. DPZ sa delí na dáta získané konvenčnými metódami, kde dáta majú podobu analógových snímok a na dáta získané nekonvenčnými metódami, kde sú dáta zaznamenávané digitálne. Metódy získavania dát sa ďalej delia na aktívne a pasívne. Pri aktívnych metódach sa napríklad využíva technológia radu alebo laseru, kedy dochádza k vyslaniu signálu z prístroja, jeho odrazeniu od meraného povrchu a záznamu odrazeného signálu. Pasívne metódy využívajú k získavaniu informácií o stave povrchu odrazené slnečné žiarenie (Campbell, 1987). DPZ je jedným z najefektívnejších spôsobov analýzy štrukturálnych charakteristík krajiny v priestore a čase. Pomocou týchto technológií je možné detailne sledovať a vyhodnocovať funkčné aspekty krajiny ako napríklad energetická výmena medzi porastom a atmosférou, reflektanciu povrchu alebo tepelný tok vegetácie.

Multispektrálne snímky nám umožňujú sledovať stav porastu a množstvo vegetácie na povrchu pôdy. Využívajú viditeľnú a blízku infračervenú časť elektromagnetického spektra. Tento druh snímok sa využíva na získavanie informácií o stave porastu a raste rastlín, nakoľko umožňujú získať informácie o prípadnom nedostatku živín, poškodené škodcami či iných prejavoch abiotického stresu na rastliny. Ich využitie nachádzame aj pri výskume reakcií rastlín na slnečné žiarenie, zisťovaní obsahu chlorofylu v rastlinách, reflektancie rôznych povrchov vrátane vegetácie, ako aj schopnosti týchto povrchov emitovať žiarenie. Využitie multispektrálnych snímok v poľnohospodárstve je zamerané najmä na zlepšenie hospodárenia s vodou a určovanie vodného stresu rastlín. Pri riešení agronomických problémov sa využívajú aj ostatné časti svetelného spektra (Hatfield et al., 2008).

Na spracovávanie dát získaných pomocou DPZ sa používajú vegetačné indexy. Pomocou reflektancie vo viditeľnom a blízkom infračervenom spektre určujú stav rastliny. Existuje veľké množstvo vegetačných indexov, kvôli veľkému rozsahu ich využitia ako aj rozsahu vstupných dát.

Jedným z najpoužívanějších je Normalizovaný diferenčný vegetačný index (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), ktorý bol vytvorený ako nástroj na hodnotenie zmien, ktoré sú spôsobené zmenou klímy a vplyvajú tak na zmenu biodiverzity krajiny, fenológiu vegetácie a jej primárnu produkciu. Primárne sa používa na monitorovanie fotosyntézy vegetácie, nakoľko zelené listy pohlcujú viditeľnú a blízku infračervenú časť spektra. V praxi sa využíva na mapovanie, vyhodnotenie a predpoveď výskytu a dopadu negatívnych atmosférických javov. NDVI sa vypočíta podľa vzorca (2). Rozsah hodnôt sa prakticky pohybuje medzi 0 a 0,8. Čím je hodnota vyššia, tým väčšia je koncentrácia chlorofylu a vegetácia je hustejšia (Pettorelli et al., 2011).

$$\text{NDVI} = (\text{R850} - \text{R680}) / (\text{R850} + \text{R680}) \quad (2)$$

kde:

R850 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 850 nm,

R680 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 680 nm.

Vodný index (Water Index – WI) označovaný aj WBI (Water Band Index) po prvýkrát charakterizoval Peñuelas a kol. (1993), je dobrým indikátorom obsahu vody v jemných pletivách, a teda najmä v listoch. Jeho hodnota sa pohybuje od 0,8 do 1,2. Čím vyššia je hodnota indexu, tým väčší je obsah vody v pletivách. Počíta sa ako pomer (3):

$$\text{WBI} = \text{R900} / \text{R970} \quad (3)$$

kde:

R900 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 900 nm,

R970 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 970 nm.

Ďalším často využívaným vegetačným indexom je index fotochemickej reflektancie (Photochemical Reflectance Index – PRI). Je to normalizovaný rozdielový index (4) využívajúci dva úzke pásy odrazivosti, ktoré sú ovplyvnené obsahom pigmentu xantofylového cyklu. Keď na list dopadá viac svetla ako rastlina dokáže využiť na fotosyntézu, časť energie sa musí rozptýliť, aby sa predišlo poškodeniu fotosyntetického aparátu. Zmena v zložení pigmentu vedie k zmenám odrazivosti. Pri nízkej intenzite svetla, keď je väčšina jeho energie využitá na fotosyntézu má PRI vysokú hodnotu a naopak, pri vysokej intenzite má hodnotu nízku, resp. negatívnu hodnotu.

$$\text{PRI} = (\text{R531} - \text{R570}) / (\text{R531} + \text{R570}) \quad (4)$$

kde:

R531 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 531 nm,

R570 – hodnota reflektancie vo vlnovej dĺžke 570 nm.

2.5 Vplyv vodného stresu na rastliny

Stres rastlín je definovaný ako externé abiotické (svetlo, teplo, voda, zasolenie) alebo biotické obmedzenie, ktoré negatívne vplyva na proces fotosyntézy a znižuje schopnosť rastliny premieňať energiu na biomasu. Environmentálne stresy spúšťajú širokú škálu reakcií rastlín, ktoré sa prejavujú od zmeny génovej expresie a bunkového metabolizmu až po zmeny v rýchlosti rastu a produktivite rastlín. Spomedzi environmentálnych stresov je stres zo sucha jedným z najnepriaznivejších faktorov pre rast a produktivitu rastlín. Vodný stres je hlavným problémom v poľnohospodárstve, pričom schopnosť odolávať mu, má nesmierny ekonomický význam. Početné fyziologické reakcie rastlín na nedostatok vody sa vo všeobecnosti líšia v závislosti od závažnosti a dĺžky trvania vodného stresu (Shao et al., 2008).

Pri pestovaní plodín závisí vplyv sucha od jeho troch hlavných charakteristík, ktorými sú závažnosť, dĺžka a načasovanie (Dracup et al., 1980). Ekológia plodín skúma environmentálne vlastnosti a procesy v systéme PRAT, ktoré určujú produktivitu pestovateľského systému a spôsoby optimalizácie využiteľných rastových faktorov. V spojení s hospodárením s vodou spája analýzu hydrologickej situácie plodín spôsobenej klímou a pôdou a fyziologickej odozvy rastliny. Cieľom analýzy je určiť stratégiu pre optimálne zásobovanie a efektívne využitie vody plodinami. Systém pestovania plodín vyžaduje porozumenie fyzikálneho, chemického a biologického fungovania, aby bolo možné dosiahnuť udržateľnú produktivitu porastu (Bodner et al., 2015). Maseda a Fernández (2006) rozlišujú morfológické, fyziologické a biochemické prejavy vodného stresu prejavy vodného.

Morfológické zmeny, ktoré vznikajú v rastlinách, majú dlhodobý charakter a zvyčajne sa prejavujú počas celého vegetačného cyklu resp. života rastliny. Prvým a najvýznamnejším účinkom sucha je znížená klíčivosť a zhoršené zakladanie porastu (Harris et al., 2002). Rast buniek je jedným z najcitlivejších procesov na suchu, pretože pri vodnom deficite dochádza k zníženiu tlaku turgoru. Rast biomasy rastlín je výsledkom delenia meristematických buniek a následnou expanziou nových buniek. Pri silnom nedostatku vody dochádza k prerušeniu jej toku z xylému do nových buniek (Nonami, 1998).

Nedostatok vody má veľký vplyv aj na vlastnosti a životnosť listov. Veľkosť plochy listov závisí od ich turgoru, teploty a asimilačnej podpory ich rastu. Zníženie plochy listov vyvolané suchom, je dôsledkom zníženia intenzity fotosyntézy. Pôsobenie vodného stresu má vplyv aj na celkovú výšku rastliny, priemer stonky ale aj počet listov (Manivannan et al., 2007). Obmedzený je aj vývoj kvetov, čo vedie k zníženiu počtu plodov resp. zŕn, a zníženiu ich plnenia v dôsledku zníženia delenia asimilátov a aktivity enzýmov sacharózy a syntézy škrobu (Anjum et al., 2011).

Vodný deficit môže viesť k výraznému poklesu výnosu porastu. Tento stav je zapríčinený pravdepodobne narušením výmeny plynov v systéme rastlina – atmosféra. Následkom tohto narušenia je zníženie prírastku biomasy listov (Farooq et al., 2009). Nízky obsah vody v pôde má vplyv na absorpciu CO₂, v dôsledku čoho dochádza k zníženiu intenzity fotosyntézy a teda uzatváraniu prieduchov listov (Flexas et al., 2004).

Fyziologické zmeny. Rastliny s rozsiahlym koreňovým systémom počas ranného štádia rastu využívajú pôdnu vodu dostupnú z vrchných vrstiev pôdy. O vplyve sucha na koreňový systém stále prebiehajú rozsiahle štúdie. Zatiaľ čo Jaleel et al. (2008) na základe experimentu uvádza, že v dôsledku stresu suchom došlo k prispôbeniu a zvýšenému rastu koreňového systému, Sacks et al. (1997) nezaznamenal žiadnu podstatnú zmenu v rýchlosti rastu koreňov. V pod-

mienkach vodného stresu korene indikujú signály cez xylém do nadzemnej časti rastliny, čo spôsobuje fyziologické zmeny, ktoré určujú adaptácie rastliny na stres. Práve tieto signály v podobe kyseliny abscisovej (ABA), cytokinínu, etylénu a ďalších sú dôvodom fyziologických zmien pod vplyvom sucha. ABA je dominantným signálom pri kontrole rastu a transpirácie. Zvyšuje odtok K^+ iónov z buniek, čo vedie k strate turgoru a následne k uzatváraniu prieduchov (Guerrero a Mullet, 1986). Medzi nestomatálne mechanizmy adaptácie na stres patria zmeny v syntéze chlorofylu, funkčné a štrukturálne zmeny v chloroplastoch, poruchy procesu akumulácie, transportu a distribúcie asimilátov (Anjum et al., 2011).

Vodný deficit má priamy vplyv na všetky zložky fotosyntézy vrátane transportu elektrónov tylakoidom, cyklu redukcie uhlíka a stomatálnej kontroly prísunu CO_2 , spolu so zvýšenou akumuláciou sacharidov, deštrukciou lipidov a narušením vodnej bilancie (Allen a Ort, 2001). Stres zo sucha spôsobuje zníženie expanzie listov, ich predčasné starnutie, oxidáciu chloroplastových lipidov a vedie k zmene pigmentov a rastlinných proteínov. Uzavretie prieduchov zbavuje listy CO_2 a znižuje fotosyntetickú asimiláciu uhlíka v prospech fotorespirácie. Pod vplyvom sucha dochádza k níženiu obsahu chlorofylu ako dôsledok straty chloroplastových membrán, nadmernému opuchu a deformácií vezikulácie lamiel a výskytu lipidových kvapôčok.

Biochemické zmeny. Jednou z prvých biochemických reakcií eukaryotických buniek na stres je tvorba reaktívnych foriem kyslíka (Reactive oxygen species – ROS). Produkcia ROS v rastlinách, známa ako oxidačné vzplanutie, je iniciálnou udalosťou pri obrannej reakcii rastlín na vodný stres. Pri dramatickom zvýšení ROS môže dôjsť k poškodeniu rastliny zvýšením peroxidácie lipidov, degradácie proteínov, fragmentácie DNA čo vedie k bunkovej smrti (Farooq et al., 2009). Následkom nadmernej produkcie ROS je zvýšenie obsahu malondialdehydu (MDA), ktorý je považovaný za indikátor oxidačného poškodenia, teda indikátor peroxidácie membránových lipidov a voľných radikálov v tkanivách (Moller et al., 2007).

3. CIEĽ PRÁCE

Táto práca je zameraná na problematiku riadenia vlhkostného režimu pôdneho profilu. S využitím merania celého komplexu hydrofyzikálnych vlastností pôd, merania rastových indexov rastlín, dendrologických zmien rastlín, prietoku miazgy v pletivách rastlín a reflexie listov. Výskum riešenej problematiky bol realizovaný v období rokov 2019 až 2021 v experimentálnej lokalite Nové Zámky. Na dosiahnutie hlavného cieľa sme si stanovili čiastkové ciele:

- oboznámenie sa s aktuálnou problematikou riadenia vlhkostného režimu,
- oboznámenie sa s metodikami meracích zariadení,
- vytvorenie základných postupov,
- založenie pokusov v laboratóriu,
- realizácia poľných meraní v lokalite Nové Zámky,
- spracovanie čiastkových výsledkov pomocou podporných softvérov jednotlivých meracích zariadení a ich spracovanie v analytickom softvéri.

Cieľom práce je stanoviť základný parameter prejavov rastlín na vodný stres, ktorý by mal čo najpresnejšie určiť potrebu zvýšenia vlhkosti v pôdnom profile v reálnom čase s cieľom optimalizovať závlahové množstvo a riadenie závlahy.

4. METODIKA PRÁCE

Terénne merania sú vykonávané v orechovom sade v katastrálnom území mesta Nové Zámky. Územný obvod mesta leží v južnej časti Nitrianskeho kraja na západe Slovenskej republiky. Podľa regionálneho geomorfologického členenia Slovenska toto územie spadá do celku Podunajská nížina časť Novozámocká pláňava (Alpsko-himalájskej sústavy, podsústavy Panónska panva, provincie Západopanónska panva, subprovincia Malá Dunajská kotlina, oblasť Podunajská nížina). Orechový sad, ktorý je v súkromnom vlastníctve sa nachádza v poľnohospodárskej časti mesta 47°59'49'' severnej šírky a 18°11'26'' východnej dĺžky a v nadmorskej výške 114 m n. m. Územie má rovinný reliéf riečnych nív s výbežkami pozdĺž tokov riek Nitra, Žitava a Hron so sklonitosťou 1 – 3°. Podľa morfológicko-morfometrického členenia spadá reliéf do horizontálnej a vertikálnej rozčlenenej roviny. Základné morfoštruktúry sú mladé poklesávajúce morfoštruktúry s agradáciou a základné morfoštruktúrne tvary sú negatívne morfoštruktúry Panónskej panvy (Atlas krajiny SR, 2020).

4.1. Metódy vyhodnocovania dát fyziologických zmien rastlín

Meranie prietoku miazgy

Na získanie hodnôt prietoku miazgy sa použili mikrosenzory SGEX-16 Dynamax Inc. (Houston, TX, USA). Senzory boli inštalované na vetvách stromov v oboch skupinách. Pred samotnou inštaláciou snímačov boli miesta umiestnenia prístrojov ošetrené prírodným olejom, aby sa zlepšila tepelná vodivosť medzi pletivom vetvy a senzorom. Každý senzor bol následne prekrytý tepelnou izolačnou penou, aby sa zabránilo tepelným stratám z termočlánku, ktorý ohrieva malý segment stonky. Ako vonkajšia ochranná vrstva bol použitý reflexný štít na ochranu monitorovaného miesta pred vonkajšími vplyvmi prostredia. Nainštalovaný senzor sa pomocou kábla pripojí k datalogeru. Pred spustením merania sa dataloger pripojí k softvéru PC400, kde sa nastaví program zaznamenávania dát ako aj interval ich záznamu. Keďže dataloger disponuje vnútornou pamäťou, nahrané dáta sa taktiež pomocou PC400 stiahnu na počítač, kde sa následne spracovávajú.

Základná rovnica, termodynamika a výpočet prietoku miazgy sú rovnaké pre všetky typy snímačov SG firmy Dynamax. Teória tepelnej bilancie stonky funguje na princípe merania teplotného rozdielu nad a pod ohrievačom. To vyžaduje ustálený stav a konštantný prísun energie. Elektrický článok nainštalovaný na stonke nepretržite ohrieva okolie senzora a teplo odobraté počas toku miazgy sa používa na výpočet pretečeného množstva miazgy v stonke v jednotkách hmotnosti za jednotku času.

Existujú dva spôsoby ako vyjadriť energetickú bilanciu ohrievača (P_{in}). Prvým spôsobom (5) je jej vyjadrenie Ohmovým zákonom ako pomer vstupného napätia (V) a odporu ohrievača (R):

$$P_{in} = V^2/R \quad (W) \quad (5)$$

Druhým spôsobom je vyjadrenie energetickej bilancie prostredníctvom Fourierovho zákona popisujúceho zvislé prepojenie komponentov (6):

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_f \quad (W) \quad (6)$$

kde:

Q_r – vplyv polomeru tepelnej vodivosti valca,

Q_v – zložky vertikálneho vedenia tepla (5), ktorá je výsledkom súčtu zložiek axiálneho vedenia tepla v stonke Q_u s Q_d ,

Q_f – termodynamika ohriatej tekutiny v izolovanej časti stonky.

Používané senzory majú výrobcom stanovenú konštrukčnú vzdialenosť termočlánkov. Vodivé komponenty prietoku nad (Q_u) a pod (Q_d) tepelným článkom sú vypočítané podľa Fourierovho zákona. Teda po odvodení sa Q_v vypočíta nasledovne (7):

$$Q_v = K_{st} \cdot A \cdot (BH - AH) / (dx \cdot 0,040) \quad (-) \quad (7)$$

kde:

K_{st} – je tepelná vodivosť stonky. Pri drevinách je jeho hodnota $0,422 \text{ m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,

A – plocha priečného prierezu stonky (m^2),

BH a AH – diferenciálne zapojené termočlánky, ktoré merajú nárast teploty,

dx – vzdialenosť medzi prepojením termočlánkov (m).

Termodynamická rovnica ohriatej tekutiny v izolovanej časti stonky počas konštantnej teploty (8), určuje zdroj vodivosti plášťa (K_{sh}) a účinky polomeru tepelnej vodivosti valca (Q_r):

$$Q_r = K_{sh} \cdot CH \quad (-) \quad (8)$$

CH v rovnici reprezentuje radiálny tepelný tok na termočlánkoch. Merané hodnoty K_{sh} a CH , ktorý automaticky vypočíta rozdiel teplôt medzi vonkajšou a vnútornou vrstvou plášťa a tým aj radiálny prenos tepla.

Prietok miazgy (F) sa vypočíta nasledovne (9):

$$F = (P_{in} - Q_v - Q_r) / (C_p - dT) \quad (\text{g} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (9)$$

Keďže miazga je z 99 % tvorená vodou, pri výpočte F má tepelná kapacita miazgy (C_p) hodnotu $4,186 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Wang et al., 2016). Ak je hodnota F rovná 0 K_{sh} sa vypočíta ako pomer energetickej bilancie (P) a vstupného napätia (V).

Pre výpočet intenzity prietoku miazgy je nevyhnutné poznať hodnotu zvýšenia teploty miazgy (dT) v $^\circ\text{C}$. Táto hodnota je meraná automaticky senzormi na základe rovnice (10):

$$dT = (AH + BH) / 2 \cdot 0,040 \quad (^\circ\text{C}) \quad (10)$$

Na získanie hodnôt prietoku miazgy sa použili mikrosenzory SGEX-16 Dynamax Inc. (Houston, TX, USA). Senzory boli inštalované na vetvách stromov v oboch skupinách. Pred samotnou inštaláciou snímačov boli miesta umiestnenia prístrojov ošetrené prírodným olejom, aby sa zlepšila tepelná vodivosť medzi pletivom vetvy a senzorom. Každý senzor bol následne prekrytý tepelnou izolačnou penou, aby sa zabránilo tepelným stratám z termočlánku, ktorý ohrieva malý segment stonky. Ako vonkajšia ochranná vrstva bol použitý reflexný štít na ochranu monitorovaného miesta pred vonkajšími vplyvmi prostredia. Nainštalovaný senzor sa pomocou kábla pripojí k datalogeru. Pred spustením merania sa dataloger pripojí k softvéru PC400, kde sa nastaví program zaznamenávania dát ako aj interval ich záznamu. Keďže dataloger disponuje vnútornou pamäťou, nahrané dáta sa taktiež pomocou PC400 stiahnu to počítača, kde sa následne spracovávajú.

Základná rovnica, termodynamika a výpočet prietoku miazgy sú rovnaké pre všetky typy snímačov SG firmy Dynamax. Teória tepelnej bilancie stonky funguje na princípe merania teplotného rozdielu nad a pod ohrievačom. To vyžaduje ustálený stav a konštantný prísun energie. Elektrický článok nainštalovaný na stonke nepretržite ohrieva okolie senzora a teplo odobraté počas toku miazgy sa používa na výpočet pretečeného množstva miazgy v stonke v jednotkách hmotnosti za jednotku času.

Existujú dva spôsoby ako vyjadriť energetickú bilanciu ohrievača (P_{in}). Prvým spôsobom (11) je jej vyjadrenie Ohmovým zákonom ako pomer vstupného napätia (V) a odporu ohrievača (R):

$$P_{in} = \frac{V^2}{R} \quad (W) \quad (11)$$

Druhým spôsobom je vyjadrenie energetickej bilancie prostredníctvom Fourierovho zákona popisujúceho zvislé prepojenie komponentov (12):

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_f \quad (W) \quad (12)$$

kde:

Q_r – vplyv polomeru tepelnej vodivosti valca,

Q_v – zložky vertikálneho vedenia tepla, ktorá je výsledkom súčtu zložiek axiálneho vedenia tepla v stonke Q_u s Q_d ,

Q_f – termodynamika ohriatej tekutiny v izolovanej časti stonky.

Používané senzory majú výrobcom stanovenú konštrukčnú vzdialenosť termočlánkov. Vodivé komponenty prietoku nad (Q_u) a pod (Q_d) tepelným článkom sú vypočítané podľa Fourierovho zákona. Teda po odvodení sa Q_v vypočíta nasledovne (13):

$$Q_v = K_{st} \cdot A \cdot (BH - AH) / (dx \cdot 0,040) \quad (-) \quad (13)$$

kde:

K_{st} – je tepelná vodivosť stonky. Pri drevinách je jeho hodnota $0,422 \text{ m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,

A – plocha priečného prierezu stonky (m^2),

BH a AH – diferenciálne zapojené termočlánky, ktoré merajú nárast teploty,

dx – vzdialenosť medzi prepojením termočlánkov (m).

Termodynamická rovnica ohriatej tekutiny v izolovanej časti stonky počas konštantnej teploty (14), určuje zdroj vodivosti plášťa (K_{sh}) a účinky polomeru tepelnej vodivosti valca (Q_r):

$$Q_r = K_{sh} \cdot CH \quad (-) \quad (14)$$

CH v rovnici reprezentuje radiálny tepelný tok na termočlánkoch. Merané hodnoty K_{sh} a CH , ktorý automaticky vypočíta rozdiel teplôt medzi vonkajšou a vnútornou vrstvou plášťa a tým aj radiálny prenos tepla.

Prietok miazgy (F) sa vypočíta nasledovne (15):

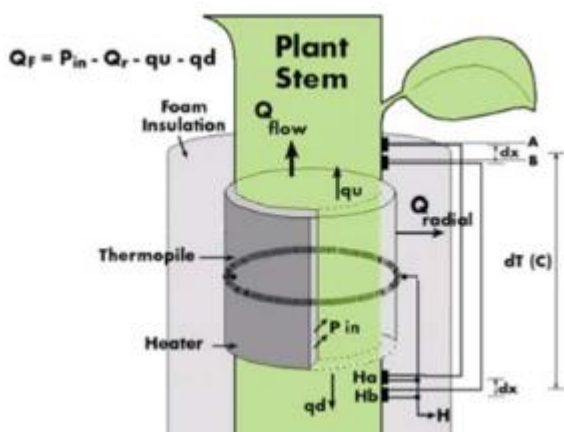
$$F = \frac{P_{in} - Q_v - Q_r}{C_p \cdot dT} \quad (g \cdot s^{-1}) \quad (15)$$

Keďže miazga je z 99 % tvorená vodou, pri výpočte F má tepelná kapacita miazgy (C_p) hodnotu $4,186 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (Wang et al., 2016). Ak je hodnota F rovná 0 K_{sh} sa vypočíta ako pomer energetickej bilancie (P) a vstupného napätia (V).

Pre výpočet intenzity prietoku miazgy je nevyhnutné poznať hodnotu zvýšenia teploty miazgy (dT) v $^\circ\text{C}$. Táto hodnota je meraná automaticky senzormi na základe rovnice (16):

$$dT = \frac{AH + BH}{2} \cdot 0,040 \quad (^\circ\text{C}) \quad (16)$$

Obr. zobrazuje jednotlivé zložky energetickej bilancie potrebné na výpočet rýchlosti toku miazgy.



Obr. 2 Schéma pre výpočet energetickej bilancie prostredníctvom senzoru prietoku mi miazgy (Dynamax Inc., 2020)

Meranie dendrologických zmien priemeru stonky

Pred začatím meraní sa jednotlivé dendrometre pripevnia na stonky. Upevnenie dendrometrov je zabezpečené opornou hliníkovou lištou s dvoma otvormi, ktorá sa gumičkou pripevní na stonku, tak aby jej stred bol kolmo na miesto požadovaného merania. Gumička musí byť upevnená pevne aby v priebehu meraní nedošlo k pohybu senzora vplyvom poveternostných

podmienok, avšak nie tak pevne, aby došlo k poškodeniu a ovplyvňovaniu prirodzeného rastu pletiva. Do otvorov na lište sa následne zasunú závitové tyčky, ktoré sú súčasťou hliníkového rámu senzora. Následne sa senzor stabilizuje utiahnutím rámu o lištu maticami. Senzor sa následne káblom pripojí na dataloger.

Nastavenie meraní prebieha prostredníctvom pripojenia datalogeru do počítača v programe HOBOWare. Tak, ako aj hodnoty prietoku miazgy, hodnoty fluktuácie konárov boli nahrávané automaticky pomocou senzorov v intervale 60 minút. Dáta zaznamenané v datalogeri boli upravované v programe MS Excel. Hodnoty fluktuácie sú zaznamenávané ako elektrický odpor v ohmoch. Pre zistenie intenzity fluktuácie v jednotkách dĺžky sme využili rovnicu (17):

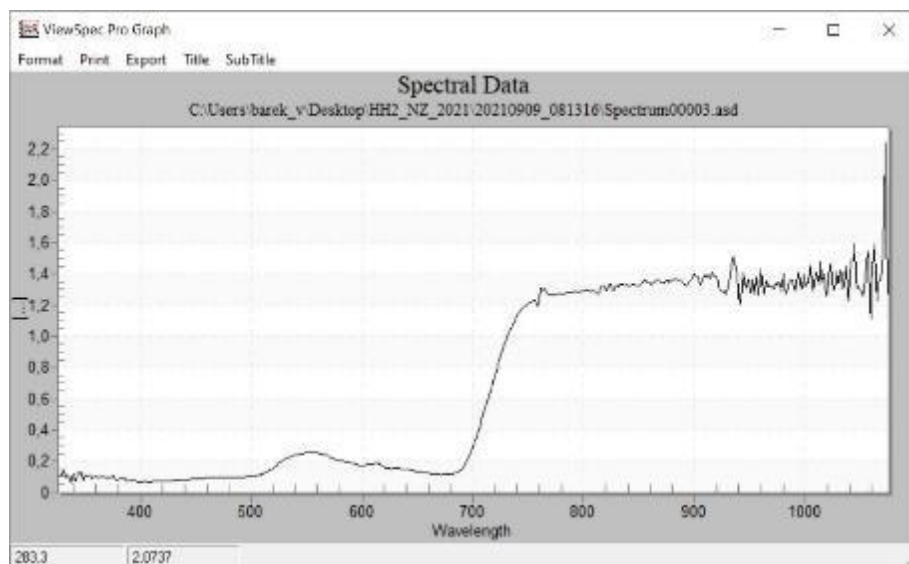
$$\mu m = \text{raw data} \cdot 4400 \quad (\mu m) \quad (17)$$

Meranie vybraných indexov odrazivosti svetelného spektra

Odrazivosť svetelného spektra od povrchu listov bola meraná pomocou ručného prístroja ASD. Merania boli realizované v intervale dvoch týždňov, podľa počasia. Merania prebiehali vždy v dopoludňajších hodinách. Na získanie čo najpresnejších dát údajov bolo realizovaných 30 meraní na každom strome v oboch variantoch. Vzhľadom na citlivosť merania odrazivosti bolo nutné prístroj kalibrovat' niekoľkokrát v priebehu jednotlivých meraní. Interval kalibrácie bol každých 30 meraní, teda po získaní údajov z každej vzorky. Kalibrácia prístroja prebieha vždy na bielej kalibračnej podložke očistenej liehom, aby sa predišlo prípadnému ovplyvňovaniu následných meraní.

Počas meraní na jednotlivých vzorkách bolo nutné získavať tieto údaje v čo najidentickjších svetelných podmienkach. V prípade veľkej premenlivosti spôsobenej napríklad vyššou oblačnosťou, bol prístroj kalibrovaný vo zvýšených intervaloch, podľa potreby. Pri meraniach sa vždy zaznamenávali údaje z čepele listov. Merania sa vykonávali pod 45° uhlom a vo vzdialenosti 30 cm od čepele.

Namerané dáta boli uložené v integrovanej pamäti prístroja. Dáta z prístroja boli prenesené do počítača pomocou softvéru HH2 Sync. Pre ich export do počítača je nutné prepojenie USB káblom. Dáta sa následne prenesú do softvéru HH2. Stiahnuté dáta boli nahrané do programu ViewSpecPro, pomocou ktorého je možné vygenerovať jednotlivé spektrálne krivky každého merania (Obr.). Po vygenerovaní kriviek boli dáta z jednotlivých meraní spracovávané v programe MS Excel. Pri vyhodnocovaní dát sme sa zamerali na vegetačné indexy WBI a NVDI.



Obr. 3 Spracovanie odrazivosti svetelného spektra v programe ViewSpecPro

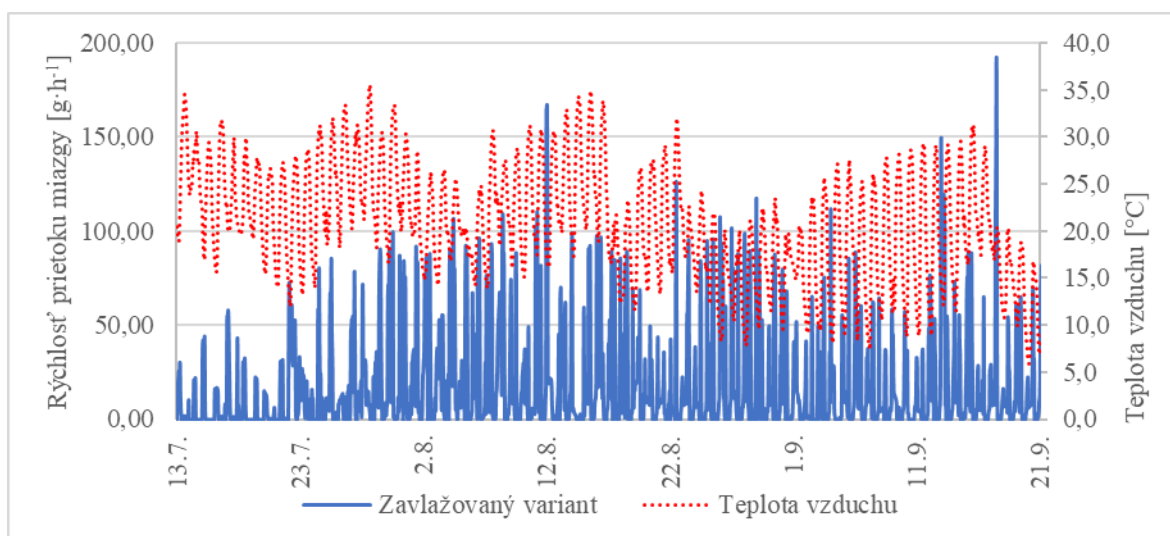
Meranie vlhkosti pôdy

Merania počas laboratórnych experimentov boli realizované prístrojmi ECH2O 10HS. Na to, aby dáta získané senzormi 10HS boli čo najpresnejšie, je nevyhnutné pri ich inštalácii dbať na zabezpečenie čo najužšieho kontaktu vidličky senzora s pôdou. Za týmto účelom je senzor, ak to pôdne podmienky umožňujú, osádzaný do neporušenej pôdy buď horizontálne alebo vertikálne. Interval zbierania dát je nastavený v hodinových intervaloch pomocou softvéru ECH2O Utility. Na spracovanie zozbieraných dát boli použitý program MS Excel.

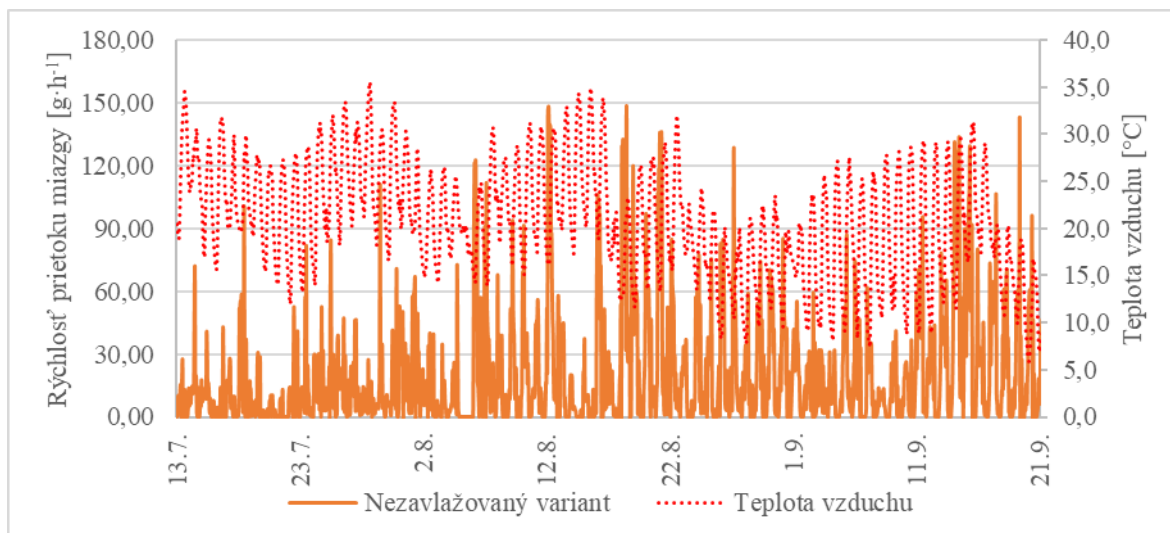
5. VÝSLEDKY RIEŠENIA A DISKUSIA

V roku 2021 boli monitorované dendrologické zmeny orecha kráľovského, prietok miazgy a realizovali sa aj merania vegetačných indexov. Všetky merania prebiehali na dvoch variantoch závlhovej dávky (zavlažovaný a nezavlažovaný variant).

Merania prietoku miazgy boli realizované od 13.7. do 21.9.2021. Po porovnaní nameraných dát prietoku miazgy v zavlažovanom aj nezavlažovanom variante s teplotou vzduchu, dosahovali hodnoty rýchlosti prietoku miazgy maximálne denné hodnoty v čase najintenzívnejšej transpirácie. Teda v čase najvyššej dennej teploty vzduchu. Najvyššia hodnota rýchlosti prietoku $187,99 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ bola nameraná 17.9.2021 o 13:00 a to tri hodiny po závlhovej dávke (Obr. 1). V nezavlažovanom variante bola maximálna rýchlosť prietoku miazgy $148,33 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ nameraná 18.8., pri maximálnej dennej teplote $23,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Obr.). Počas pozorovaného obdobia spadlo úhrnne 92,3 mm dažďových zrážok. Závlhová dávka bola dodávaná automaticky v zavlažovanom variante, ak hodnota potenciálu pôdnej vody dosiahla 80 cbar. Priebeh krivky obsahu vody v pôde mal podobný priebeh, avšak namerané hodnoty sa v oboch variantoch líšili.

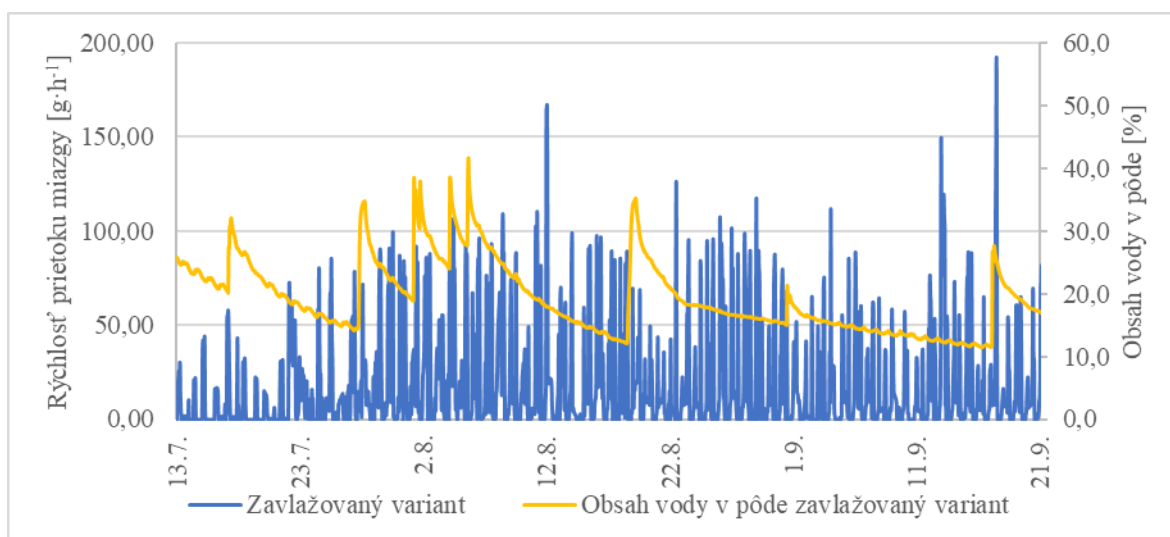


Obr. 1 Priebeh prietoku miazgy v zavlažovanom variante v závislosti s teplotou vzduchu

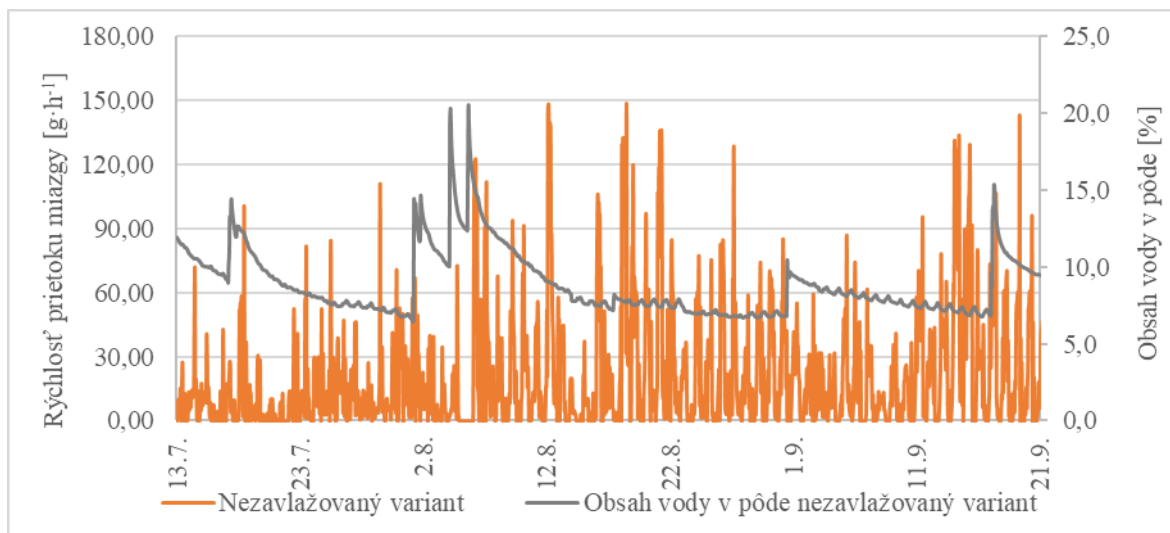


Obr. 5 Priebeh prietoku miazgy v nezavlažovanom variante v závislosti s teplotou vzduchu

V prípade zavlažovaného variantu dosahovali vyššie hodnoty (Obr. a Obr.). Tento jav je možné pripísať zákonitostiam pohybu vody v pôdnom profile.

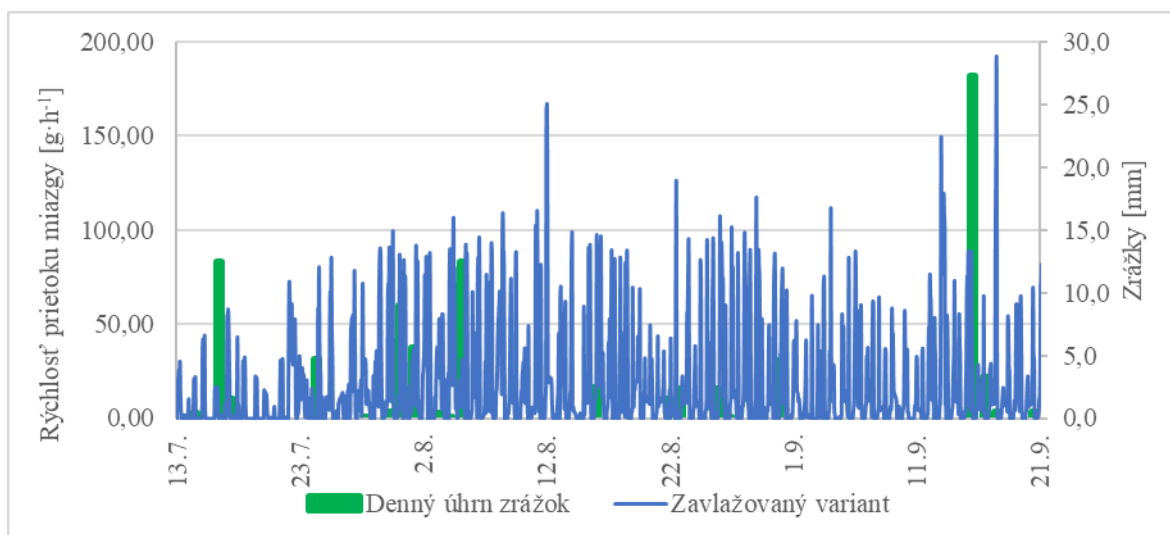


Obr. 6 Priebeh prietoku miazgy v zavlažovanom variante v závislosti s obsahom vody v pôde

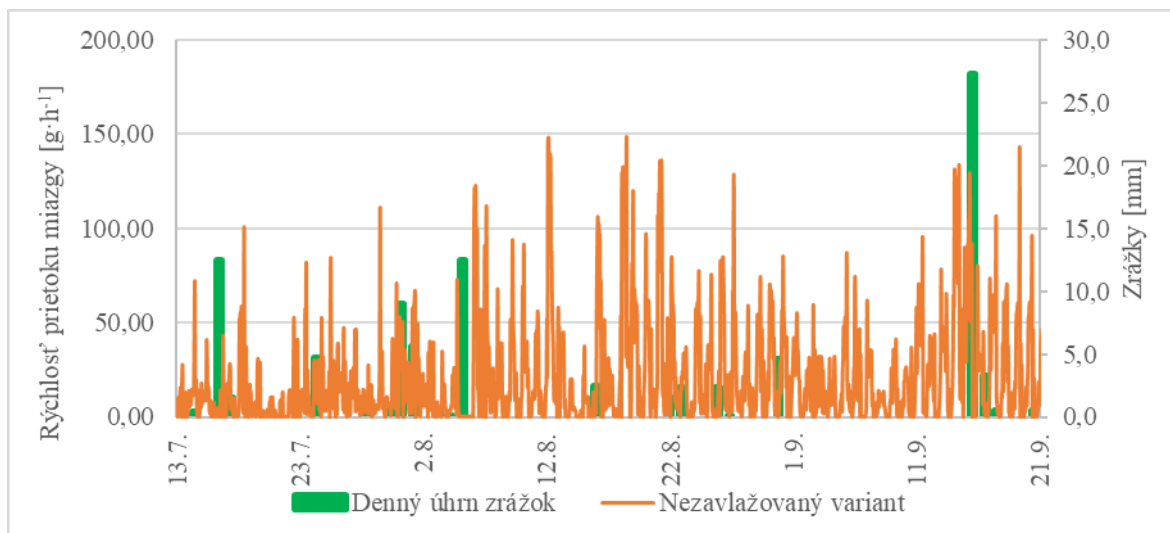


Obr. 7 Priebek prietoku miazgy v nezavlažovanom variante v závislosti s obsahom vody v pôde

Najväčší denný úhrn bol nameraný 16.9., kedy spadlo 27,3 mm zrážok za jeden deň (Obr. a Obr.). Táto hodnota je rovnaká pre oba varianty.

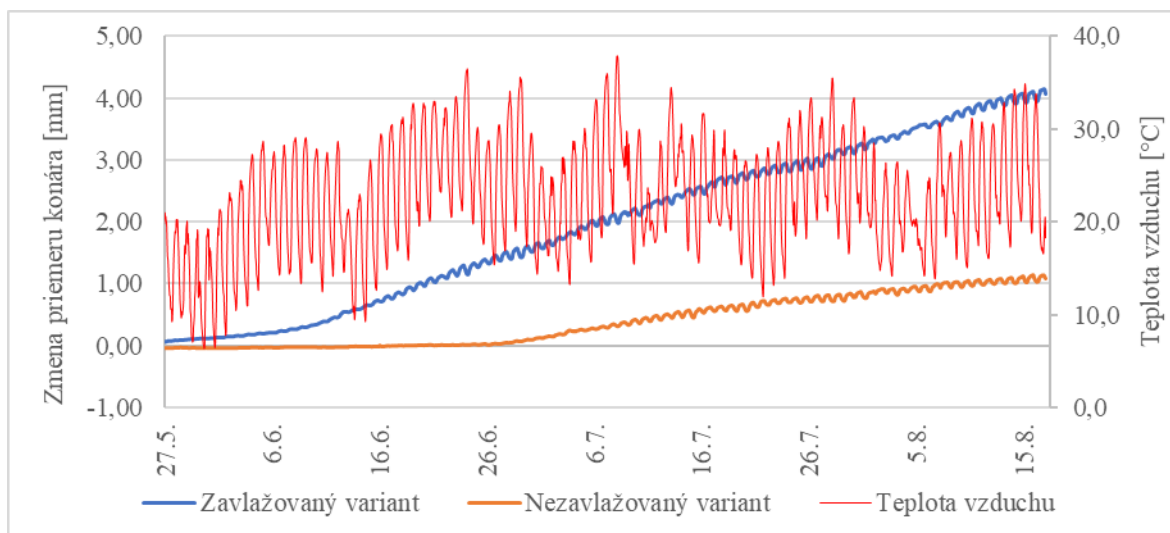


Obr. 8 Priebek prietoku miazgy v zavlažovanom variante v závislosti so zrážkami



Obr. 9 Priebeh prietoku miazgy v nezavlažovanom variante v závislosti so zrážkami

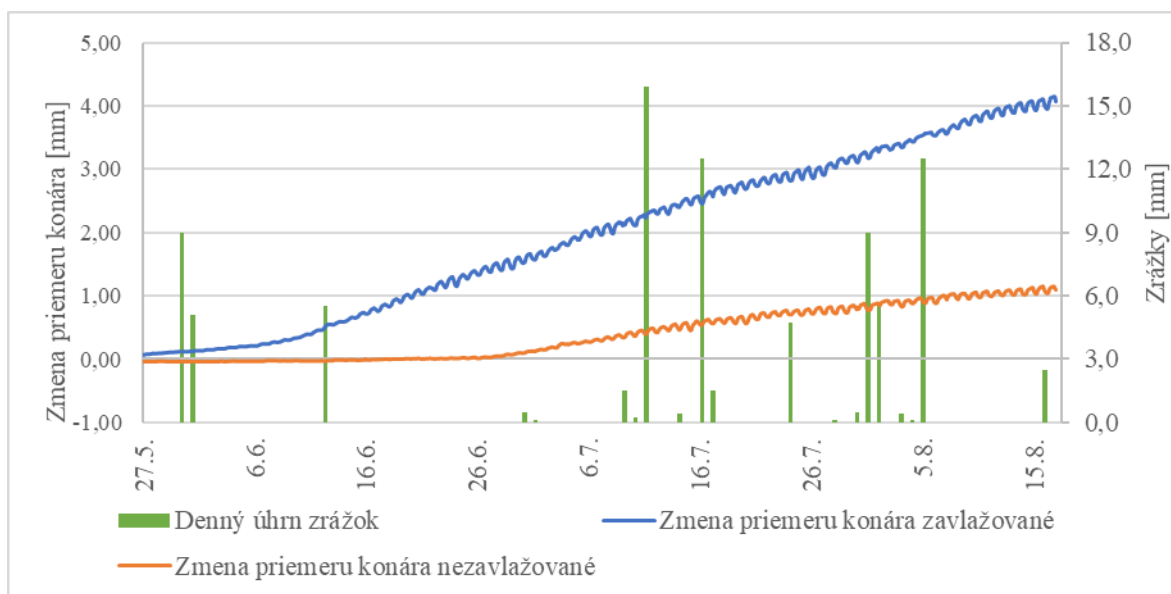
Pri meraní dendrologických zmien sme sa ako v predchádzajúcich rokoch zamerali na fluktuáciu priemeru konárov. Merania boli realizované od 27.5. do 10.8.2021. Priebeh fluktuácie priemerov bol v oboch variantoch na začiatku merania takmer rovnaký. Prvé významnejšie zmeny medzi variantmi boli zaznamenané od 3.6., kedy nočné teploty vzduchu neklesli pod 10 °C (Obr.). Zatiaľ čo v zavlažovanom variante bola expanzia a trvalý nárast priemeru konárov zaznamenávaný od začiatku júna, priemery v nezavlažovanom variante sa takmer nemenili až do začiatku júla.



Obr. 10 Priebeh zmien priemeru konárov orecha v oboch variantoch v porovnaní s teplotou vzduchu

Táto zmena pri nezavlažovanom variante bola zapríčinená vyšším úhrnom zrážok (Obr.), v období kedy už pozorované stromy mali plne vyvinuté listy koruny a dažďovú vodu, ktorá bola jediným zdrojom pôdnej vody, začali biochemické a biologické procesy premieňať na

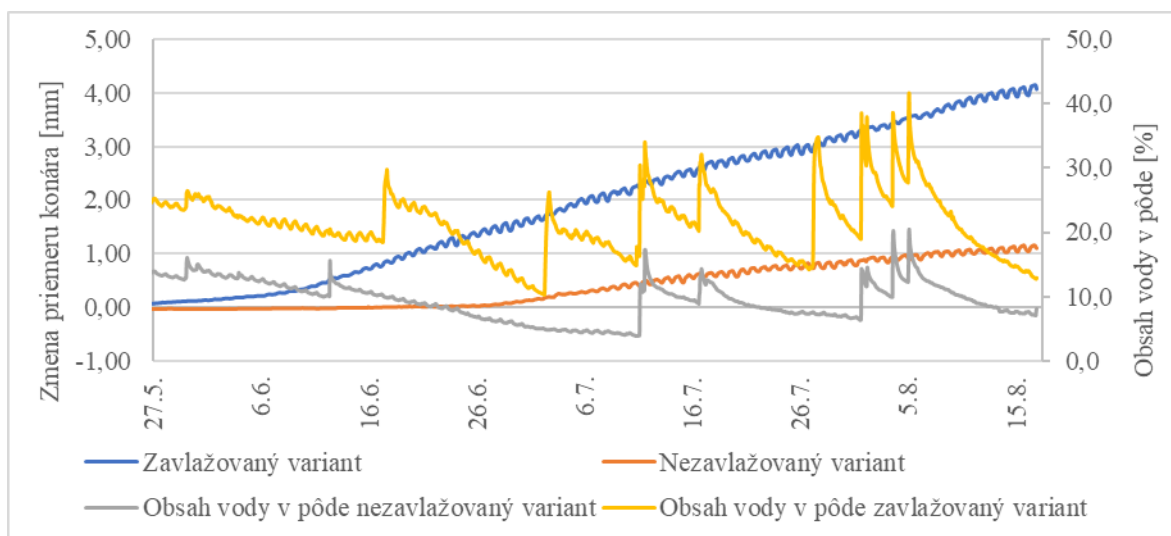
biomasy konárov. V období od 27.5. do 1.6.2021 spadlo 20 mm zrážok, zatiaľ čo v období júl – august spadlo spolu 73,5 mm zrážok.



Obr. 11 Pribeh zmien priemeru konárov orecha v oboch variantoch v porovnaní so zrážkami

Rozdiel vo vývoji obsahu vody je zobrazený na Obr. . Na základe meraní je zrejmé, že dodatočné závlahové dávky mali vplyv na prírastok biomasy.

Celkový prírastok priemeru konára v zavlažovanom variante bol 4,08 mm a v nezavlažovanom variante to bolo takmer o 75 % menej, 1,09 mm.



Obr. 12 Pribeh zmien priemeru konárov orecha v oboch variantoch v porovnaní s obsahom vody v pôde

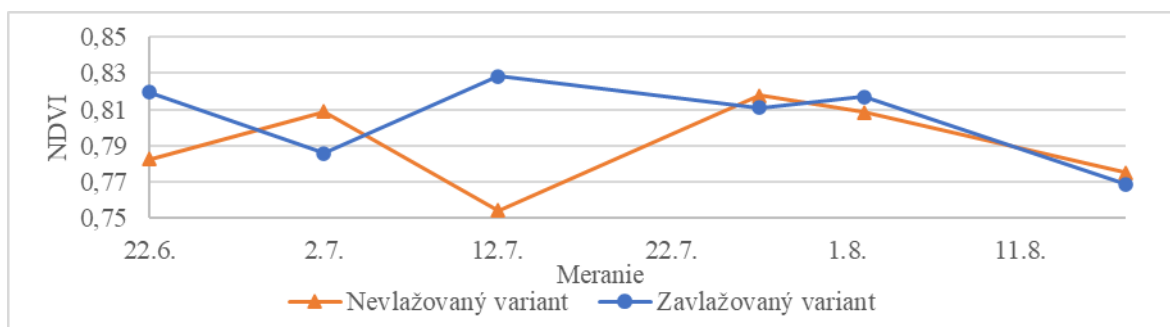
Pri hodnotení závislosti medzi pozorovanými parametrami v roku 2021 (vlhkosť pôdy, prietok miazgy a dendrologické zmeny) pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu bol

identifikovaný štatisticky významný vzťah ($*** P < 0,001$) medzi vlhkosťou pôdy a dendrologickými zmenami a medzi prietokom miazgy a dendrologickými zmenami pri stromoch, kde nebola závlaha (Tab. 1). Pri stromoch, ktoré boli zavlažované sa našla štatisticky významná závislosť ($** P < 0,01$; $*** P < 0,001$) medzi prietokom miazgy a dendrologickými zmenami a medzi vlhkosťou pôdy a prietokom miazgy (Tab. 1).

Tab. 1 Pearsonove korelačné závislosti medzi vybranými parametrami (v zavlažovanom a nezavlažovanom variante) ($** P < 0,01$; $*** P < 0,001$)

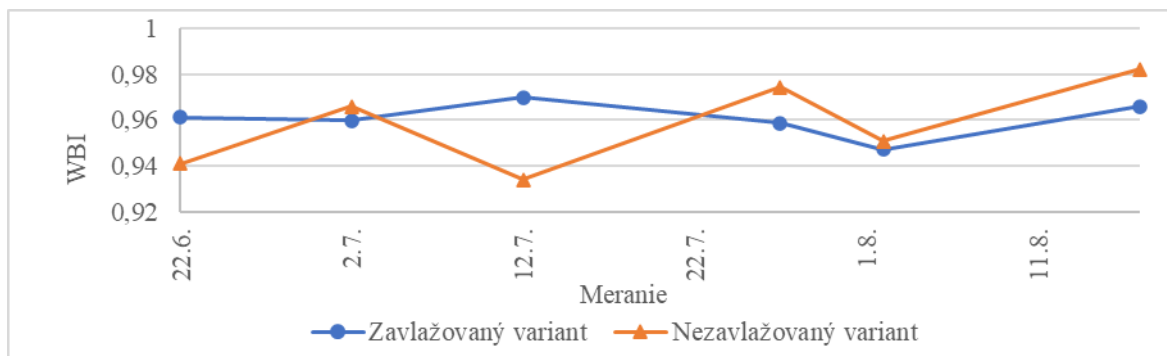
2021	<i>Nezavlažovaný variant</i>	<i>Zavlažovaný variant</i>
Vlhkosť pôdy vs. Dendrologické zmeny	0,109 ***	0,068
Prietok miazgy vs. Dendrologické zmeny	0,106 ***	0,233 ***
Vlhkosť pôdy vs. Prietok miazgy	0,032	0,061 **

Merania pomocou spektrometra boli vykonané v roku 2021. Prvé merania vybraných vegetačných indexov boli vykonané v oboch závlahových variantoch, ktoré sme následne porovnávali medzi sebou. Index NDVI je ovplyvňovaný obsahom chlorofylu v listoch. Pri porovnávaní priemerných hodnôt nameraných na skúmaných stromoch sa hodnoty kondície listov striedajú. Tento jav je možné pripísať zvýšenej požiadavke zavlažovaných stromov na vodu, keďže väčší obsah biomasy listov v korune zavlažovaných stromov zvyšuje požiadavku na vodu. Hodnota NDVI sa zvýšila po aplikácii závlahovej dávky. Pri nezavlažovanom variante sa hodnoty znižovali spolu so znižujúcimi sa úhrnmi zrážok a na začiatku augusta.



Obr. 13 Vplyv závlahovej dávky na vegetačný index NDVI

WBI bol pri meraniach použitý na hrubý odhad obsahu vody v listoch, čo nám poskytlo informácie o rozdieloch medzi dvoma variantmi. Merania vegetačných indexov (Obr.) dokazujú lepší fyziologický stav koruny u zavlažovaných stromov, ktoré reagovali na závlahové dávky a aj na prirodzené zrážky. Fyziologický stav listov pri nezavlažovanom variante bol premenlivejší. V dôsledku spadnutých zrážok v období medzi 12.7. a 27.7., kedy spadlo úhrnne 18,7 mm zrážok, sa začala kondícia nezavlažovaných stromov zlepšovať.



Obr. 14 Vplyv závlhovej dávky na vegetačný index WBI

Pri hodnotení závislosti medzi pozorovanými vegetačnými indexami v roku 2021 (NDVI a WBI) pomocou Pearsonovho korelačného koeficientu nebol identifikovaný štatisticky významný vzťah.

Tab. 2 Pearsonove korelačné závislosti medzi vegetačnými indexami (v zavlažovanom a nezavlažovanom variante)

2021	Nezavlažovaný variant	Zavlažovaný variant
NDVI vs. WBI	0,332	0,181

6. ZÁVER

V tejto práci sme zisťovali vplyv závlhovej dávky na dendrologické zmeny, prietok miazgy a vybrané vegetačné indexy. Z výsledkov našich meraní vyplýva, že na všetkých druhoch skúmaných rastlín bol preukázaný pozitívny vplyv zvýšeného príjmu vody do systému rastliny. Najvýznamnejšie sa zvýšený príjem vody prejavil pri dendrologických meraniach. Merania realizované v laboratóriu, preukázali, že variant *Helianthus annuus* L. a *Zea mays* L. s častejším intervalom zavlažovania dosiahol násobne väčšiu expanziu stonky na konci merania. Využitím umelého slnečného svetla dosiahli rovnaký vplyv transpirácie na oba varianty, čím sme simulovali premenlivosť denného cyklu. Elsheikh (2015) skúmala vplyv rôznych závlhových intervalov na rôzne prejavy dendrologických zmien, vrátane zmien priemerov stoniek slnečnice a to najmä v počiatočných fenologických fázach do ukončenia kvitnutia.

Výskum dendrologických zmien na drevinách prebiehal v areáli orechového sadu v lokalite Nové Zámky. V priebehu experimentu sme skúmané stromy vystavili rôznym závlhovým podmienkam. Jedna skupina bola zavlažovaná len s prirodzenými zrážkami a druhej bola dodávaná dodatočná závlaha. Počas 3 rokov meraní sme získali obraz o zmenách vo vývoji biomasy v konároch a zmien v rýchlosti prietoku miazgy pod vplyvom závlah. Počas meraní bol zaznamenaný významný rozdiel v expanzii priemerov konára s výnimkou obdobia pučania a dozrievania plodov. Lui et al. (2019) vo svojej štúdií poukazujú na dôležitosť koreňového systému *Juglans regia* L. na zlepšenie riadenia závlah. Výsledky ich výskumu ukázali,

že voda prijímaná orechmi pochádza z vrstvy 0 – 20 cm vo fáze klíčenia a expanzie listov a vo vrstve 20 – 40 cm v ostatných fenologických fázach. Tým, že skúmané stromy sú relatívne mladé, vodu čerpajú najmä z vrchnej vrstvy pôdy.

Fernández, Green a Caspari (2008) skúmali tri metódy využitia prietoku miazgy na riadenie závlah v olivovom sade. Z ich štúdie vyplýva, že vodný stres má vplyv na tvar profilu prúdenia miazgy, avšak spustenie zavlažovania na základe týchto údajov nie je možné, nakoľko sa rýchlostný profil prietoku miazgy ukázal, ako nie prediktívny ukazovateľ. V ich štúdií sa ako vhodná metóda ukázala metóda transpiračného pomeru založená na modeli využívania vody rastlinami na základe listovej plochy. Avšak pri praktickom použití v poľnohospodárstve vyžaduje podrobné údaje o mikroklíme a pôdných podmienkach, má vysoké nároky na používané technické vybavenie, čo predstavuje zvýšené náklady s rizikom, že v závere nedokážeme efektívne zvoliť závlahovú dávku a zavlažovanie bude nedostatočné, resp. sa nevyhneme nadmernému zavlažovaniu. Na základe našich výsledkov, keď prietok miazgy koreluje s vlhkosťou pôdy pri zavlažovaných stromoch, môžeme konštatovať, že prietok miazgy je obmedzeným ukazovateľom vodného stresu rastlín. Z časového hľadiska však táto metóda nie je efektívna, keďže namerané dáta nám ukazovali len retrospektívny stav stromov.

Claudio a kol. (2008) skúmali využiteľnosť pri odhade stavu vody vo vegetácii. Zo spektrálnej odrazivosti odvodili WBI a NDVI. V spektrách odrazivosti boli zjavné špecifické reakcie druhov na vlhké a suché obdobia, čo poskytlo základ pre rozdelenie druhov na základe ich optických vlastností. WBI významne koreloval s NDVI, čím sa odhalilo silné prepojenie medzi obsahom vody v korunách a štruktúrou zelených korún. Tento vzťah sa však líšil v závislosti od druhu a stavu vody, čo poskytuje dôkaz o vzájomnej nezávislosti týchto dvoch optických indexov. Naše merania prebiehali počas jedného vegetačného obdobia a výsledky našich meraní preukázali podobnosť vo vývoji indexu počas prvých meraní, avšak tieto merania nepreukázali žiadnu závislosť.

Všetky metódy na zisťovanie reakcie rastlín na vodný stres sú v zahraničnej literatúre bohato popísané, aj keď sa každý z autorov zamerával na iné parametre, ktoré vzájomne porovnávali. Jedinečnosť systému RASTLINA – PÔDA, vytvára obmedzené podmienky na presné porovnávanie, keďže aj pri porovnávaní toho istého druhu rastlín a pôdy, vždy sa musí brať do úvahy jedinečnosť lokality, klímy, skúmaných rastlín a aj použitých prístrojov. V súčasnej dobe na Slovensku, používanie takejto prístrojovej techniky je veľmi málo rozšírené v praktickom sektore, a vo väčšine sa využíva len na výskumné účely. V závere našich skúmaní sme dospeli ku stanovisku, že z pomedzi nami vybranými výskumnými metódami monitorovania vodného stresu na riadenie závlah, je najvhodnejšiu metódou meranie zmien priemeru stonky. Na porovnávanie ostatných metód je nutný ďalší výskum.

POUŽITÁ LITERATÚRA

1. AHAMMED, Sumaiya Jarin et al. 2020. Assessment of changing pattern of crop water stress in Bangladesh. In *Environment, development and sustainability* [online], vol. 22, pp. 4619-4637 [cit. 2022-01-25]. ISSN 1573-2975. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s10668-019-00400-w>>.

2. ALLEN, Damian J. – ORT, Donald R. 2001. Impacts of chilling temperature on photosynthesis in warm-climate plants. In *Trends in plant science* [online], vol. 6, no. 1, pp. 36-42 [cit. 2022-01-27]. ISSN 1878-4372. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s10668-019-00400-w>>.
3. ANJUM, Shakeel Ahmad et al. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. In *African journal of agricultural research* [online], vol. 6, no. 9, pp. 2026-2035 [cit. 2022-01-27]. ISSN 1991-637X. Dostupné na: <<https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>>.
4. ANTAL, J. et al. 2014. *Hydrológia poľnohospodárskej krajiny*. Nitra : SPU. 371 s. ISBN 978-80-552-1257-9.
5. ASSOULINE, S. et al. 2012. Impact of water regime and growing conditions on soil-plant interactions: From single plant to field scale. In *Vadose Zone Journal* [online], vol. 11, no. 3 [cit. 2020-10-25]. ISSN 1539-1663. Dostupné na: <<https://doi.org/10.2136/vzj2012.0006>>.
6. BANERJEE, Koushik et al. 2019. Chapter 4 - Methods of Using Nanomaterials to Plant Systems and Their Delivery to Plants (Mode of Entry, Uptake, Translocation, Accumulation, Biotransformation and Barriers). In *Advances in Phytonanotechnology*. USA : Academic press. pp. 123-152, ISBN 978-0-12-815322-2.
7. BEDNÁŘ, J. 1989. *Pozorované jevy v atmosféře : Atmosférická optika, akustika a elektřina*. 1. vyd. Praha : Česká akademie věd. 236 s. ISBN 80-200-0054-2.
8. BODNER, Gernot. – NAKHFOROOSH, Alireza. – KAUL, Hans-Peter. 2015. Management of crop under drought: a review. In *Agronomy for sustainable development* [online], vol. 35, s. 401–442 [cit. 2020-10-25]. ISSN 1773-0155. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>>.

9. BOGENA, Heye Reemt et al. 2017. Effective calibration of low-cost soil water content sensors. In *Sensors* [online], vol. 17, no. 12, 208 s. [cit. 2021-12-20]. ISSN 1424-8220. Dostupné na: <<http://dx.doi.org/10.3390/s17010208>>.
10. Boulder : ASD Inc. 2010 *FieldSpec® HandHeld 2™ Spectroradiometer User Manual* [online] ©2010 [cit. 2020-12-20]. Dostupné na: <<http://www.geo-informatie.nl/courses/grs60312/material2017/manuals/600860-dHH2Manual.pdf>>.
11. BRÁZDIL, R. et al. 2015. *Historie počasí a podnebí v českých zemích XI: Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost*. Brno : Centrum výzkum globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i. 402 s. ISBN 978-80-87902-11-0.
12. CAMPBELL, James B. Introduction to remote sensing. New York: Guilford Press, 1987, 662 s. ISBN 0-89862-776-1.
13. ČERMÁK, J. – KUČERA, J. – NADEZHDINA, N. 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. In *Trees* [online], vol. 18, pp. 529-546 [cit. 2020-11-05]. ISSN 1432-2285. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>>.
14. ČIMO, Ján et al. 2020. Change in the Length of the Vegetation Period of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.), White Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata) and Carrot (*Daucus carota* L.) Due to Climate Change in Slovakia. In *Agronomy* [online], vol. 10, no. 8, s. 1110 [cit. 2022-02-05]. ISSN 2073-4395. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/agronomy10081110>>.
15. DA SILVA, Elizamar Ciriaco et al. 2011. Drought stress and plant nutrition. In *Plant Stress (Special Issue)* [online] vol. 1, pp. 32-41 [cit. 2020-11-05]. ISSN 266-064X. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/209959355_Drought_Stress_and_Plant_Nutrition>.
16. DRACUP, John A. – LEE, Kill Seong – PAULSON Jr., Edwin G. 1980. On the statistical characteristics of drought events. In *Water resources research* [online] vol. 16, no. 2, pp. 289-296 [cit. 2020-02-05]. ISSN 0043-1397. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1029/WR016i002p00289>>.
17. Dynamax Inc. 2007. *Dynagage Sap Flow Sensor User Manual*. 2007 [online] © 2007 [cit. 2020-11-05]. Dostupné na: <https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage_Manual.pdf>.
18. Dynamax Inc. 2020. *Flow32-1K Sap Flow Monitoring System Installation & Operation Manual* [online] ©2007-2020 [cit. 2020-11-05]. Dostupné na: <https://dynamax.com/images/uploads/papers/Flow32-1K_Manual.pdf>.
19. Enviroportál. 2020. *Atlas krajiny Slovenskej republiky*. 2020 [online] ©2002-2022 [cit. 2020-11-14]. Dostupné na: <<https://app.sazp.sk/atlassr/>>.
20. ELSHEIHK, Eman Rahamtalla Ahmed. 2015. Water productivity of Sunflower under different irrigation regimes at Gezira clay soil, Sudan. 1. vyd. Balkema : CRC Press. 168 s. ISBN 978-94-6257-460-1.
21. FAROOQ, M. et al. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Agronomy for sustainable development* [online], vol. 29, pp. 185-212 [cit. 2022-02-05]. ISSN 1773-0155. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1051/agro:2008021>>.

22. FENDEKOVÁ, Miriam et al. 2010. *Hydrologické sucho*. 1. vyd. Bratislava : UK. 190 s. ISBN 978-80-969342-7-0.

23. FENG, Sifang et al. 2019. Probabilistic evaluation of the impact of compound dry-hot events on global maize yields. In *The Science of the Total Environment* [online], vol. 689, pp. 1228–1234 [cit. 2022-02-06]. ISSN 0048-9697. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.373>>.

24. FERNÁNDEZ, Enrique et al. 2017. Methods to estimate sap flow [online] 9 s. [cit. 2020-11-05]. Dostupné na: <https://www.ishs.org/sites/default/files/documents/methods_0.pdf>.

25. FERNÁNDEZ, José Enrique et al. 2008. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. In *Plant and Soil* [online], vol. 305, pp. 91–104 [cit. 2021-03-20]. ISSN 1573-5036. Dostupné na: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-007-9348-8>>.

26. FLEXAS, J. et al. 2004. Understanding down-regulations of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. In *Annals of botany* [online], vol. 144, pp. 273-283 [cit. 2020-03-20].

ISSN 0305-7364. Dostupné na: <<http://plantmed.uib.es/papers/2004/understanding%20down.pdf/>>.

27. Dynamax Inc. 2007. *Flow32-1K Sap Flow Monitoring System Installation & Operation Manual* [online] ©2020 [cit. 2020-11-05]. Dostupné na: <https://dynamax.com/images/uploads/papers/Flow32-1K_Manual.pdf/>.

28. FORSTER, Michael A. 2017. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration?. In *Forests* [online], vol. 8, no. 9, 350 s. [cit. 2020-11-04]. ISSN 1999-4907. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/f8090350>>.

29. GARCÍA-TEJERA, Omar et al. 2021. The pitfalls of water potential for irrigation scheduling. In *Agricultural Water Management* [online], vol. 243, 106522 s. [cit. 2020-10-30]. ISSN 0378-3774. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106522/>>.

30. GUERRERO, Felix – MULLET, John E. 1986. Increased abscisic acid biosynthesis during plant dehydration requires transcription. In *Plant physiology* [online], vol. 80, no. 2, pp. 588-591 [cit. 2022-03-29]. ISSN 1532-2548. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1104/pp.80.2.588/>>.

31. HATFIELD, J. L. et al. 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decision. Celebrate the Centennial. In *Supplement to Agronomy Journal* [online], vol. 100, pp. 117 – 131 [cit. 2022-03-29]. ISSN 2073-4395. Dostupné na: <<https://doi.org/10.2134/agronj2006.0370c>>.

32. JAIN, Sanjay K. et al. 2010. Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: A case study for Rajasthan, India. In *Natural Hazards* [online], vol. 54, no. 3, pp. 643–656 [cit. 2022-03-29]. ISSN 1573-0840. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s11069-009-9493-x>>.

33. JALEEL, Cheruth A. et al. 2009. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. In *International journal of agriculture and biology* [online], vol. 11, no. 1, pp. 100-105 [cit. 2022-03-09]. ISSN 1715-9596. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/s11069-009-9493-x>>.

34. KANELLOU, E. et al. 2008. Index-based drought assessment in semi-arid areas of Greece based on conventional data. In: *European water* [online], vol. 23/24, pp. 87-98 [cit. 2022-01-29]. ISSN 1664-462X. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/228766241_Index-based_drought_assessment_in_semi-arid_areas_of_Greece_based_on_conventional_data/>.

35. KIM, Yangmin. X. et al. 2018. Composite transport model and water and solute transport across plant roots: an update. In *Frontiers in plant science* [online], vol. 9, 193 s. [cit. 2020-10-30]. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00193/>>.

36. *Klimatické pomery Slovenskej republiky*. 2020 [online] Bratislava : SHMÚ [cit. 2020-10-25]. Dostupné na: <<http://www.shmu.sk/sk/?page=1064>>.

37. *Klimatický atlas SR*. 2020 [online] Bratislava : SHMÚ [cit. 2020-11-11]. Dostupné na: <<https://klimat.shmu.sk/kas/>>.

38. *Kukurica siata (Zea mays L.)*. 2021. [online] Katedra rastlinnej výroby FAPZ, SPU, [cit. 2021-01-14]. Dostupné na: <[http://www.krv.fapz.uniag.sk/plodiny/Kukurica %20siata.pdf](http://www.krv.fapz.uniag.sk/plodiny/Kukurica%20siata.pdf)>.

39. KRASNOVSKY, A. A. JR. 1982. Delayed fluorescence and phosphorescence of plant pigments. In *Photochemistry and Photobiology* [online], vol. 36. No. 6. p. 733-741 [cit. 2022-04-14]. ISBN 0031-8655. Dostupné na: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1751-1097.1982.tb09497.x>>.
40. Li, Xing et al. 2015. Use of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to Characterize the Drying Trend in Southwest China from 1982–2012. In *Remote Sensing* [online], vol. 7, no. 8, pp. 10917-10937 [cit. 2022-04-14]. ISSN 2072-4292. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/rs70810917>>.
41. LIU, Yang et al. 2019. The Depth of Water Taken up by Walnut Trees during Different Phenological Stages in an Irrigated Arid Hilly Area in the Taihang Mountains. In *Forests* [online], vol. 10, no. 2, 121 s. [cit. 2022-04-14]. ISSN 1999-4907. Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/f10020121>>.
42. LUGOJAN, C. – CIULCA, S. 2011. Evaluation of relative water content in winter wheat. In *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology* [online], vol. 15, no. 2, pp. 173-177. [cit. 2022-04-16]. ISSN 2066-1797. Dostupné na: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-relative-water-content-in-winter-Lugojan-Ciulca/ea7a09fe3cd4e136a20930e508e4db8f4a63e3ad>>.
43. *Mars II 400 Full Spectrum Grow Led Lights – Mars Hydro*. 2020 [online] Shenzhen : Marshydro. [cit. 2020-11-15] Dostupné na: <<https://ledgrowlightguide.com/mars-hydro-mars-ii-led-grow-light-review/>>.
44. MANIVANNAN, C. et al. 2007. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. In *Colloids and surface B: Biointerfaces* [online], vol. 59, no. 2, pp. 141-149 [cit. 2022-04-15]. ISSN 0977-7765. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.002>>.
45. MASEDA, Pablo H. – FERNÁNDEZ, Roberto J. 2006. Stay wet or else: three ways in which plants can adjust hydraulically to their environment. In *Journal of experimental botany* [online], vol. 57, no. 15, pp. 3963–3977 [cit. 2022-03-21]. ISSN 0022-0957. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erl127>>.
46. MASSON-DELMOTTE, V., et al. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In *Summary for Policymakers* [online] Geneva : World Meteorological Organization, 32 s. [cit. 2022-01-15] Dostupné na: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>.
47. McKEE, T. B. – DOESKEN, N. J. – KLEIST, J. 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceeding of the Eighth Conference on Applied Climatology [online] American Meteorological Society s. 179-184. [cit. 2020-11-30] Dostupné na: <https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf>.
48. METER Group, Inc. USA. 2020. *ECH2O 10 HS*. 2020 [online] © 2019 [cit. 2020-11-25]. Dostupné na: <http://publications.metergroup.com/Manuals/20426_10HS_Manual_Web.pdf/>.

49. MISHRA, Ashok K. – SINGH, Vijay P. 2010. A review of drought concepts. In *Journal Hydrol* [online], vol. 391, no. 1–2, pp. 202–216 [cit. 2020-01-15]. ISSN 0022-1694. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012/>>.
50. MOLLER, Ian Max – JENSEN, Poul Erik – HANSSON, Andreas 2001. Oxidative modifications to cellular components in plants. In *Annual review of plant* [online], vol. 58, pp. 459-481 [cit. 2022-03-20]. ISSN 1545-2123. Dostupné na: <[10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946)>.
51. NAVARA, Ján 2010. *Orech kráľovský (Juglans regia L.) a jeho pestovanie*. Bratislava : Veda. 76 s. ISBN 978-80-224-1123-3.
52. NOBEL, P. 2009. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4. vyd. USA : Academic press. 604 s. ISBN 978 – 01-237-4143-1.
53. NONAMI, H. 1998. Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials. In *Journal of plant research* [online], vol. 111, pp. 373–382 [cit. 2022-03-23]. ISSN 0918-9440. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1007/BF02507801>>.
54. OTN ŽP 3113-1. 2007. *Hydrologické údaje povrchových vôd. Kvantifikácia malej vodnosti. Časť 1: Stanovenie charakteristík malej vodnosti vo vodomerných staniciach*.
55. PEÑUELAS, J. et al. 1993. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. In *International journal of remote sensing* [online], vol. 14, no. 10, pp. 1887-1905 [cit. 2021-11-25]. ISSN 1366-5901. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1080/01431169308954010>>.
56. PETTORELLI, Nathalie et al. 2011. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. In *Climate research* [online], vol. 46, pp. 15-27 [cit. 2021-11-26]. ISSN: 1616-1572. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/233408135_The_Normalized_Difference_Vegetation_Index_NDVI_Unforeseen_successes_in_animal_ecology>.
57. *Plant growth, Sap flow, Leaf temperature, Soil moisture*. 2020 [online] Dachau/Munich : Ecomatic GmbH [cit. 2020-11-25]. Dostupné na: <https://ecomatik.de/wp-content/uploads/2020/04/Ecomatik_catalog_en_2020_online_version.pdf>.
58. PLÁNKA, L. 2007: *Dálkový průzkum Země. Modul 01 – Teoretické základy*. [online] FAST VUT : Brno. 58 s. [cit. 2022-02-25]. Dostupné na: <<https://adoc.pub/vysoke-ueni-technicke-v-brn-fakulta-stavebni-dalkovy-przkum-641901b03f175607e955cc886e95c2dd87436.html>>.
59. POCKMAN, William T. – SPERRY, John S. – O'LEARY, James W. 1995. Sustained and significant negative water pressure in xylem. In *Nature* [online], vol. 378, pp. 715 – 716 [cit. 2022-03-25]. ISSN 1476-4687. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1038/378715a0>>.
60. POLÁŠKOVÁ, Anna. 2011. *Úvod do ekologie a ochrany životního prostředí*. Praha: Karolinum, 284 s. ISBN 978-80-246-1927-9.
61. POLLEGIONI, Paola et al. 2010. Pollen biology and hybridization process: Open problem in Walnut. In *Pollen: Structure, types and effects*. New York : Nova Science Publisher, s. 65-99. ISBN 978-1-61668-669-7.
62. PORTELA, M. M. et al. 2015. Drought analysis in Slovakia: regionalization, frequency analysis and precipitation thresholds. In *Transaction on Ecology and the Environment* [online], vol.

- 197, pp. 237-248 [cit. 2022-03-10]. ISSN 1743-3541. Dostupné na: <<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/RM15/RM15021FU1.pdf>>.
63. POSPÍŠILOVÁ, Lubica. et al. 2016. Standard analytical methods and evaluation criteria of soil physical, agrochemical, biological, and hygienic parameters. Brno : Mendel u. v Brně 123 s. ISBN 978-80-7509-438-4.
64. RAJSEKHAR, Deepthi – SINGH, Vijay P. – MISHRA, Ashok K. 2015. Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. In *Journal of Hydrology* [online], vol. 526, pp. 164–182 [cit. 2022-03-30]. ISSN 0022-1694. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1038/378715a0>>.
65. REES, W. G. 2012. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press : New York. 492 s. ISBN 052118116X.
66. REHÁK, Š. et al. 2015. *Zavlažovanie poľných plodín, zeleniny a ovocných sádov*. Bratislava : VEDA. 640 s. ISBN 978-80-224-1429-6.
67. ROGERS, R. 2004. Temperate ecosystems / Juglandaceae. In *Encyclopedia of Forest Science*. USA : Academic Press, p. 1427-1430. ISBN 978-01-214-5160-8.
68. RUSSO, Simone et al. 2013. Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in Europe with stationary and nonstationary Standardized Precipitation Indices. In : *Journal of geophysical research: Atmospheres* [online], vol. 118, no. 14, pp. 7628-7639 [cit. 2022-03-30]. ISSN 2169-8996. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1002/jgrd.50571>>.
69. SACKS, M. M. – SILK, W. K. – BURMAN, O. 1997. Effect of Water Stress on Cortical Cell Division Rates within the Apical Meristem of Primary Roots of Maize. In *Plant physiology* [online], vol. 114, no. 2, pp. 519-527 [cit. 2022-02-27]. ISSN 0032-0889. Dostupné na: <https://doi.org/10.1104/pp.114.2.519>>.
70. SHAO, Hong-Bo et al. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. In: *Comptes rendus biologie* [online], vol. 331, no. 3, pp. 215-225 [cit. 2022-02-27]. ISSN 1631-0691. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.01.002>>.
71. SHI, Haiyun et al. 2018. A new method and a new index for identifying socioeconomic drought events under climate change: A case study of the East River basin in China. In *Science of the total environment* [online], vol. 616-617, pp. 363-375 [cit. 2022-02-10]. ISSN 0048-9697. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.321>>.
72. SILVA, Elizamar C. et al. 2009. Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. In *Brazilian Journal of Plant Physiology* [online], vol. 21, no. 1, pp. 43-53 [cit. 2022-02-11]. ISSN 1677-9452. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1590/S1677-04202009000100006>>.
73. *Sľečnica ročná (Helianthus annuus L.)*. 2021. [online] Katedra rastlinnej výroby FAPZ, SPU, [cit. 2021-01-14]. Dostupné na: <<http://www.krv.fapz.uniag.sk/plodiny/Sľečnica%20ročna.pdf>>.
74. SMITH, Andrew F. 2007. Plant roots. Growth, activity and interaction with soils. In *Annals of Botany* [online], vol. 100, no. 1, pp. 151-152 [cit. 2020-11-01]. Dostupné na: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2735306/>>.

75. SMT 100. 2017. [online] Neustadt : Treubner GmbH [cit. 2020-11-06]. Dostupné na: < <http://www.truebner.de/smt100/>>.
76. *State of the Global Climate Change 2020*. 2021 [online] Geneva : WMO [cit. 2021-03-25]. Dostupné na: < https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618>.
77. ŠOBEK, Jozef 1958. *Ořešák a jeho pěstování*. Praha : ČSAV. 336 s.
78. ŠTEKAUEROVÁ, V. – NAGY, V. – KOTOROVÁ, D. 2006. *Soil water regime of agricultural field and forest ecosystems*. Bratislava : Biologia. Vol. 6, no. 19, s. 300-304, ISSN 1336-9563.
79. TAIZ, L. – ZEIGER, E. 2002. *Plant physiology*. 3. vyd. Sunderland : Sinauer Associates Inc. 2002. 690 s. ISBN 978-0878938230.
80. TALLAKSEN, L. M. – VAN LANEN, H. A. J. 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater In *Developments in water science*. Elsevier Science 2004. 500 s. ISBN 978-0444517685.
81. TU, Xinjun et al. 2018. Multivariate design of socioeconomic drought and impact of water reservoirs. In *Journal of Hydrology* [online], vol. 566, pp. 192–204 [cit. 2022-01-06]. ISSN 0022-1694. Dostupné na: < <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.012>>.
82. UHER, Anton et al. 2016. *Pol'né a záhradné plodiny*. 2. nezmen. vyd. Nitra: SPU. 305 s. ISBN 978-80-552-1474-0.
83. VAN LANEN, H. A. J, et al. 2004. Flow generating processes. In: *Development in Water Science*. Vol. 48, p. 53–96 In: *developments in water science*. Elsevier Science 2004. 500 s. ISBN 978-0444517685.
84. VAVŘÍČEK, Dušan – KUČERA, Aleš 2015. *Lesnická pedologie pro posluchače LDF*. Brno : Mendelova u. v Brně, 214 s.
85. VESCOVO, Loris et al. 2012. New spectral vegetation indices based on the near-infrared shoulder wavelengths for remote detection of grassland phytomass. In: *International Journal of Remote Sensing* [online], vol. 33, no. 7, pp. 2178-2195 [cit. 2020-11-06]. ISSN 1366-5901. Dostupné na: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3859895/>>.
86. VINCENTE-SERRANO, Sergio M. et al. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In: *Journal of climate* [online], vol. 23, no. 7, pp. 1696 – 1718 [cit. 2022-01-06]. ISSN 0894-8755. Dostupné na: < <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>>.
87. *Vybrané indexy pre monitoring sucha SHMÚ*. 2021 [online] Bratislava: SHMÚ, . Dostupné na: <<https://www.shmu.sk/sk/?page=2162>>.
88. WANG, Wenbin et al. 2016. Environmental factors effect on stem radial variations of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains, Northwestern China. In *Forests* [online], vol. 7, no. 10, 210 s. [cit. 2021-01-20]. EISSN 1999-4907. Dostupné na: < <https://doi.org/10.3390/f7100210>>.
89. WILHITE, Donald A. – GLANTZ, Mickey H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. In: *Water International* [online], vol. 10, no. 3, pp. 111-120 [cit. 2020-12-06]. ISSN 0250-8060. Dostupné na:

https://www.researchgate.net/publication/240371212_Understanding_the_Drought_Phenomenon_The_Role_of_Definitions#fullTextFileContent/>.

90. WOLD, Svante – ANTTI, Henrik – LINDGREN, Frederik – ÖHMAN, Jerker. 1998. Orthogonal signal correction of near-infrared spectra. In *Chemometrics and intelligent laboratory systems* [online], vol. 44, no. 1-2, pp. 175-185 [cit. 2022-02-06]. ISSN 0169-7439. Dostupné na: <[https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(98\)00109-9/](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(98)00109-9/)>.

91. YU, Huiqian et al. 2019. Modified Palmer Drought Severity Index: Model improvement and application. In *Environment international* [online], vol. 130, 104951 s. [cit. 2022-02-06]. ISSN 0160-4120. Dostupné na: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104951>>.

92. ZEMEK, F. et al. 2014. *Airborne remote sensing: Theory and practice assessment of terrestrial ecosystems*. Brno : Global Research Center AS CR. 159 s. ISBN: 978-80-8790205-9.

93. *Zhodnotenie sucha na Slovensku za rok 2021. 2022* [online] Bratislava : SHMÚ [cit. 2021-03-25]. Dostupné na: <<https://www.shmu.sk/en/?page=2049&id=1189>>.